A. I. KAPANDJI

PHYSIOLOGIE ARTICULAIRE

6e édition



1

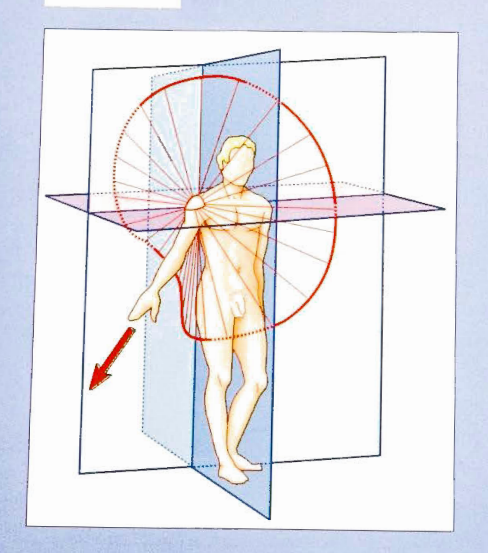
Épaule

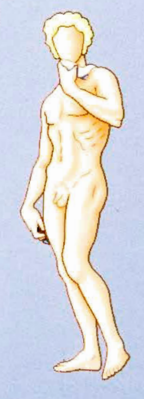
Coude

Prono-supination

Poignet

Main





MALOINE

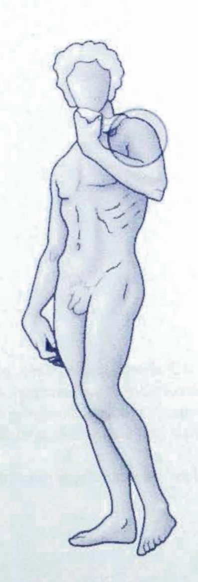
A.I. KAPANDJI

Ancien interne des Hôpitaux de Paris
Ancien chef de clinique chirurgicale à la faculté de médecine de Paris
Assistant des Hôpitaux de Paris
Membre de la Société française d'orthopédie et de traumatologie
Président 87-88 de la Société française de chirurgie de la main (GEM)
Membre de la Société américaine et de la Société italienne de chirurgie de la main

PHYSIOLOGIE ARTICULAIRE

SCHÉMAS COMMENTÉS DE MÉCANIQUE HUMAINE

Préface du Professeur Raoul Tubiana



1

6e édition

1. Épaule
2. Coude
3. Prono-supination
4. Poignet
5. Main

805 dessins originaux de l'auteur

MALOINE
27, rue de l'École-de-Médecine – 75006 Paris – France
2005

Chez le même éditeur :

I.A. Kapandji, *Physiologie articulaire tome 2*. Membre inférieur, (5[e] édition, nouveau tirage), 2004
I.A. Kapandji, *Physiologie articulaire tome 3*. Tronc et rachis, (5[e] édition, nouveau tirage), 2004
I.A. Kapandji, *Dessins de main*, 1989

DESSINS
Conception et réalisation : A.I. Kapandji. (Adalbert@kapandji.com)
Adaptation graphique à l'édition : C. Martinet

Mise en page : PrescriCom 86140 Scorbé-Clairvaux

Dépôt légal : mai 2005 – ISBN 2 224 02647 1
Achevé d'imprimer par Bookprint, Espagne.

Préface

C'est un honneur pour moi de préfacer la 6e édition de *Physiologie Articulaire* d'Adalbert Kapandji. Déjà traduit en onze langues, Adalbert Kapandji est probablement l'auteur médical français vivant le plus lu à l'étranger.

Cette nouvelle édition, considérablement enrichie et rendue encore plus attrayante par l'emploi de la couleur, s'adresse à un vaste public. Elle intéressera non seulement les chirurgiens orthopédistes, qui en sont les premiers bénéficiaires, mais aussi l'ensemble du corps médical, les kinésithérapeutes, les étudiants en anatomie, et tous ceux que les merveilleux engrenages de la mécanique humaine intriguent, ou qui sont sensibles à l'harmonie des corps.

J'admire depuis bien longtemps le travail d'Adalbert Kapandji. Grâce à ses connaissances chirurgicales et biomécaniques, il a modernisé et revivifié l'anatomie traditionnelle en lui apportant un éclairage fonctionnel et un support scientifique.
Doué d'un véritable sens artistique, il a su illustrer ses textes d'innombrables dessins facilitant leur compréhension et rendant l'apprentissage de la Biomécanique plus plaisant, ce qui leur a valu un succès éducatif partout reconnu.

Adalbert Kapandji a réalisé cette œuvre considérable en solitaire, sans l'appui d'institutions académiques ou universitaires, ce qui prouve qu'en matière de recherche et d'enseignement, et peut-être aussi dans d'autres domaines, le cadre, aussi utile puisse-t-il être, a moins d'importance que la valeur individuelle.

Professeur Raoul Tubiana
Membre de l'Académie de chirurgie
Fondateur de la Société française de chirurgie de la main (G.E.M.)
Directeur de l'Institut de la Main
Ancien Président de la Fédération internationale des sociétés de chirurgie de la main

Avertissement à la sixième édition

Depuis sa première édition, remontant maintenant à plus de trente-cinq ans, l'intérêt suscité par ce livre ne s'est pas démenti, que ce soit auprès des médecins et chirurgiens, qu'auprès des kinésithérapeutes-rééducateurs et des ostéopathes. Sa carrière à l'étranger repose sur dix traductions, non seulement dans les principales langues européennes, mais aussi en japonais et même en coréen…

Il faut cependant reconnaître que les connaissances évoluent, ainsi que les techniques d'édition. C'est pourquoi il a semblé judicieux, tant à l'auteur qu'à l'éditeur, d'entreprendre la refonte complète de cet ouvrage.

Cette édition marquera sans doute une nouvelle naissance, car le texte et les schémas ont été enrichis et surtout, tous les dessins et schémas ont été mis en couleurs, ce qui les rend encore plus vivants et attractifs. Cela représente un gros travail, rendu possible par l'informatique…

Nous espérons donc qu'une nouvelle jeunesse s'ouvre devant cet ouvrage devenu un classique universellement connu et apprécié.

Table des matières

Chapitre 2 Le coude ... 76

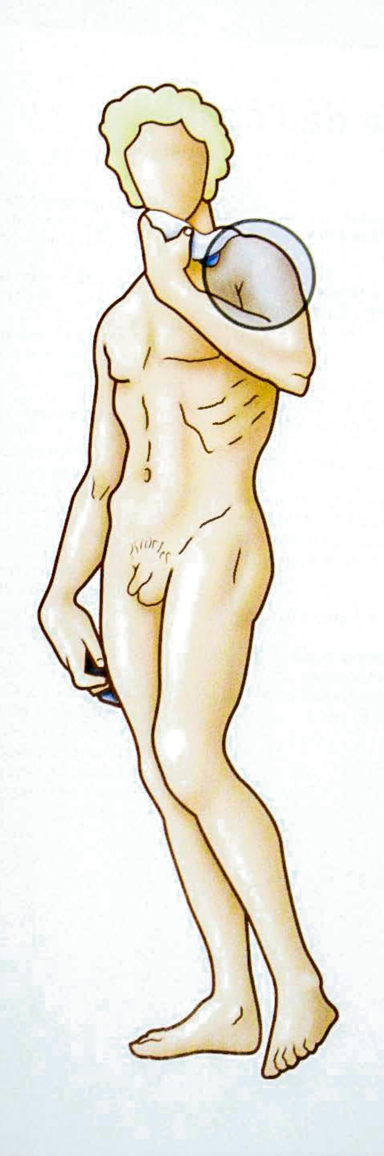
Chapitre 3 La prono-supination 104

Chapitre 4 Le poignet 146

Chapitre 5 La main 198

Chapitre 1

L'ÉPAULE



Physiologie de l'épaule

L'épaule, **articulation proximale** du membre supérieur (Fig. 1, p. 9), est la **plus mobile** de toutes les articulations du corps humain.

Elle possède **trois degrés de liberté** (Fig. 2), ce qui lui permet d'orienter le membre supérieur par rapport aux **trois plans de l'espace**, grâce à **trois axes principaux** :

1) **Axe transversal**, contenu dans un plan frontal : il autorise les mouvements de flexion-extension exécutés dans un plan sagittal (Fig. 3 et 4 p. 13).

2) **Axe antéro-postérieur**, contenu dans un plan sagittal : il permet les mouvements d'abduction (le membre supérieur s'écarte du plan de symétrie du corps) et d'adduction (le membre supérieur se rapproche du plan de symétrie) effectués dans un plan frontal (Fig. 7, 8, 9, 10 p. 15).

3) **Axe vertical**, déterminé par l'intersection du plan sagittal et du plan frontal : il commande les mouvements de flexion et d'extension exécutés dans un plan horizontal, le bras étant en abduction à 90°, aussi appelés flexion-extension horizontale (Fig. 17, 18, 19 p. 19).

L'axe longitudinal de l'humérus 4 autorise la rotation externe/interne du bras et du membre supérieur suivant deux modes distincts :

1) **La rotation volontaire** (ou encore « rotation adjointe » de Mac Conaill) qui utilise le troisième degré de liberté (Fig. 11, 12, 13 p. 17) et n'est possible que dans les **articulations à trois axes** (les énarthroses). Elle résulte de la contraction des muscles rotateurs ;

2) **La rotation automatique** (ou encore « rotation conjointe » de Mac Conaill) qui apparaît sans aucune action volontaire dans les **articulations à deux axes** ou bien encore dans les articulations à trois axes lorsqu'elles sont utilisées comme des articulations à deux axes. Nous en reparlerons plus loin à propos du « paradoxe » de Codman (p. 25).

La position de référence est définie comme suit :
Le membre supérieur est pendant le long du corps, verticalement, si bien que l'axe longitudinal de l'humérus 4 coïncide avec l'axe vertical 3. Dans la position d'abduction à 90°, l'axe longitudinal 4 coïncide avec l'axe transversal 1. Dans la position de flexion à 90°, il coïncide avec l'axe antéro-postérieur 2.
L'épaule est donc bien une articulation à trois axes principaux et à trois degrés de liberté, l'axe longitudinal de l'humérus pouvant coïncider avec l'un d'eux ou bien se situer dans une position intermédiaire quelconque pour autoriser le mouvement de rotation externe/interne.

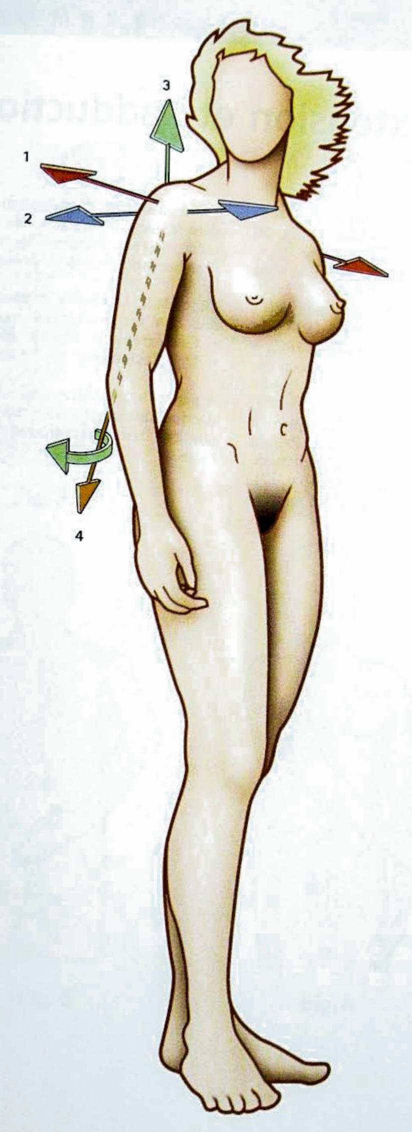


Fig. 2

La flexion-extension et l'adduction

Les mouvements de **flexion-extension** (Fig. 3, 4, 5, 6) sont exécutés dans un plan sagittal (Plan A, Fig. 20 p. 21), autour d'un axe transversal (Axe 1, Fig. 2) :

- **Extension** : mouvement de faible amplitude 45 à 50° ;
- **Flexion** : mouvement de grande amplitude 180°; noter que la même position de flexion à 180° peut aussi être définie comme une abduction à 180°, à la rotation longitudinale près (voir plus loin au paradoxe de Codman).

On emploie souvent, et à tort, les termes d'antépulsion pour flexion et de rétropulsion pour extension. Prêtant à confusion avec les mouvements du moignon de l'épaule dans le plan horizontal (Fig. 14, 15, 16 p. 17), il est préférable de ne pas les utiliser pour les mouvements du membre supérieur.

Les mouvements **d'adduction** (Fig. 5, 6) s'effectuent dans le plan frontal à partir de la position de référence (adduction absolue), mais ils sont mécaniquement impossibles en raison de la présence du tronc.

Cependant, à partir de la position de référence, l'adduction n'est possible que combinée à :

- Une **extension** (Fig. 5) : adduction très faible ;
- Une **flexion** (Fig. 6) : l'adduction atteint 30 à 45°.

À partir d'une position quelconque en abduction, l'adduction, dite alors « adduction relative », est toujours possible, dans le plan frontal, jusqu'à la position de référence.

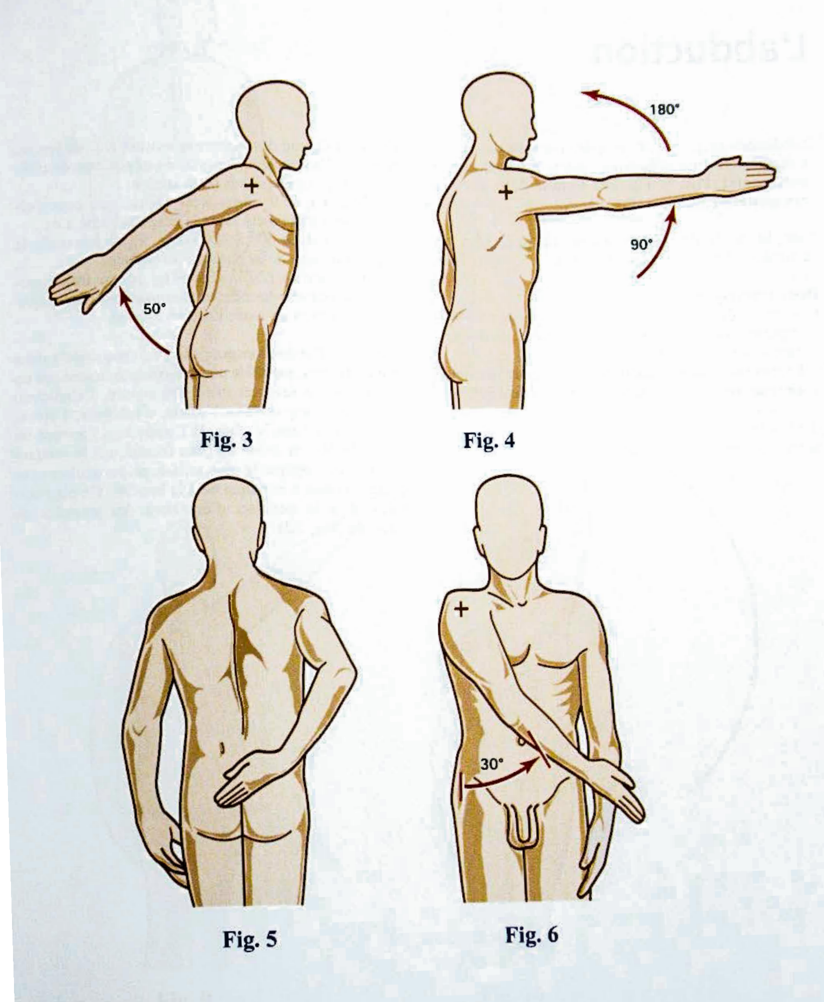


Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

L'abduction

L'abduction (Fig. 7, 8, 9, 10), mouvement qui écarte le membre supérieur du tronc, est exécutée **dans un plan frontal** (Plan B, Fig. 20), **autour d'un axe antéro-postérieur** (Axe 2, Fig. 2).

L'amplitude de l'abduction atteint 180° : le bras est vertical au-dessus du tronc (Fig. 10).

Deux remarques :

- À partir de 90°, l'abduction rapproche le membre supérieur du plan de symétrie du corps, et devient stricto sensu une adduction.
- La position finale d'abduction 180° peut aussi être atteinte par un mouvement de flexion de 180°.

Du point de vue des actions musculaires et du jeu articulaire, l'**abduction**, à partir de la position de référence (Fig. 7), passe par **trois stades** :

1) Abduction de 0° jusqu'à 60° (Fig. 8) qui peut s'effectuer uniquement dans la scapulo-humérale ;
2) Abduction de 60° à 120° (Fig. 9) qui nécessite la participation de la scapulo-thoracique ;
3) Abduction de 120° à 180° (Fig. 10) qui utilise, outre la scapulo-humérale et la scapulo-thoracique, l'inclinaison du tronc du côté opposé.

Noter que l'abduction pure, décrite uniquement dans le plan frontal, parallèle au plan d'appui dorsal, est un mouvement assez peu usité. Par contre, l'abduction combinée à une certaine flexion, c'est-à-dire l'élévation du bras dans le plan de l'omoplate, formant un angle de 30° en avant du plan frontal, est le mouvement physiologique le plus utilisé, en particulier pour porter la main à la nuque ou à la bouche. Ce plan correspond à la position d'équilibre des muscles de l'épaule (Fig. 22).

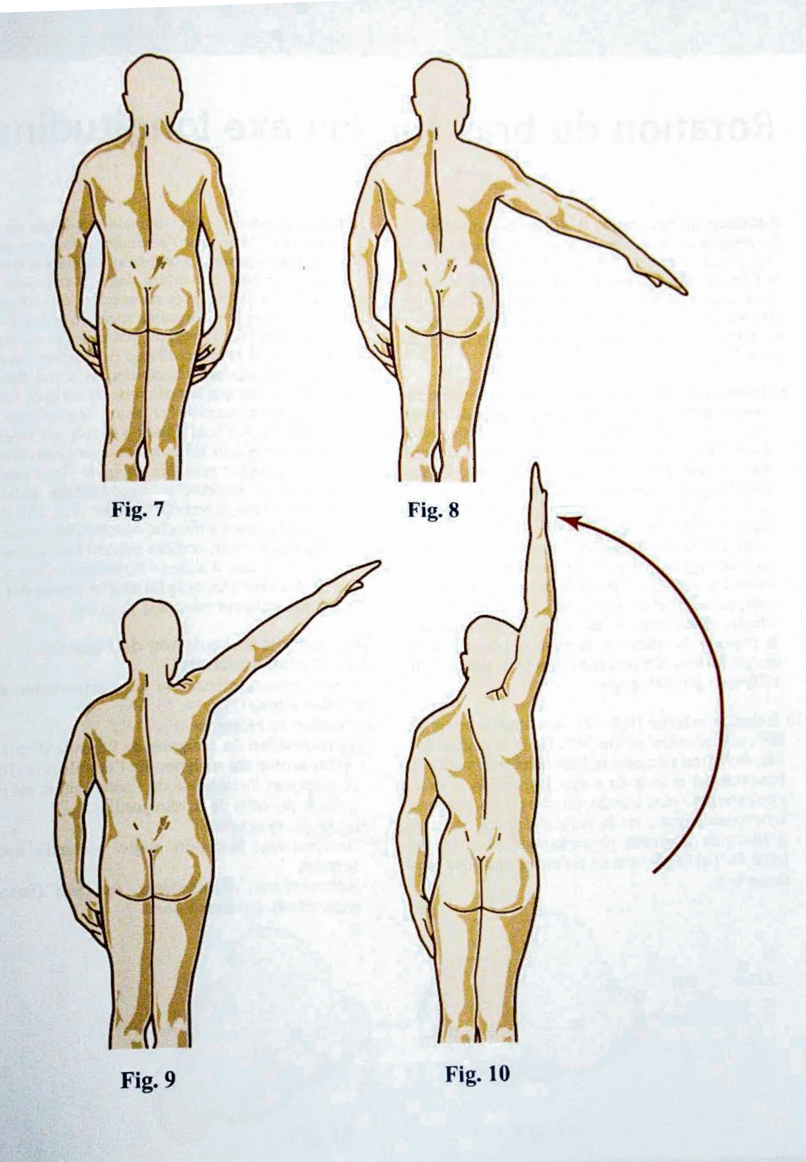


Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

Fig. 10

Rotation du bras sur son axe longitudinal

Rotation du bras dans la scapulo-humérale

La rotation du bras sur son axe longitudinal (Axe 3, Fig. 2) peut s'effectuer en n'importe quelle position de l'épaule. C'est la **rotation volontaire ou adjointe** des articulations à trois axes et trois degrés de liberté. On cote cette rotation habituellement dans la position de référence du bras pendant verticalement le long du corps (Fig. 11, 12, 13 : vue supérieure).

a) **Position de référence** (Fig. 11), dite de rotation externe-interne 0° : pour mesurer l'amplitude de ces mouvements de rotation, le coude est obligatoirement fléchi à 90°, l'avant-bras étant alors contenu dans le plan sagittal. Sans cette précaution, à l'amplitude des mouvements de rotation externe-interne du bras s'ajouterait celle des mouvements de prono-supination de l'avant-bras.
Cette position de référence, avant-bras contenu dans un plan sagittal, est prise de façon purement arbitraire. En pratique, la position de départ la plus utilisée, parce qu'elle correspond à l'équilibre des rotateurs, est en rotation interne de 30° par rapport à la position de référence, la main se trouvant alors devant le tronc. On pourrait l'appeler la **position de référence physiologique**.

b) **Rotation externe** (Fig. 12) : son amplitude est de 80° ; elle n'atteint jamais 90°. Cette amplitude totale de 80° est rarement utilisée dans cette position, bras vertical le long du corps. Par contre, la rotation externe la plus utilisée, donc la plus importante fonctionnellement, est le secteur compris entre la position de référence physiologique (rotation interne 30°) et la position de référence classique (rotation 0°).

c) **Rotation interne** (Fig. 13) : son amplitude est de 100 à 110°. Mais pour l'atteindre, il faut nécessairement **faire passer l'avant-bras derrière le tronc**, ce qui combine un certain degré d'extension de l'épaule. La liberté de ce mouvement est indispensable pour que la main puisse atteindre le dos. C'est la condition de l'hygiène périnéale postérieure. Quant aux 90 premiers degrés de rotation interne, ils s'accompagnent obligatoirement d'une flexion de l'épaule tant que la main reste en avant du tronc. Les muscles moteurs de la rotation longitudinale seront étudiés plus loin. Quant à la rotation longitudinale du bras dans les positions autres que celle de référence, elle ne peut être cotée de façon précise que dans un **système de coordonnées polaires** (Fig. 24) ou par le test du méridien (Fig. 25). Pour chaque position, les muscles rotateurs interviennent de façon différente, certains perdent leur action rotatrice alors que d'autres l'acquièrent. Ceci n'est qu'un des exemples de la **loi de l'inversion des actions musculaires** suivant la position.

Mouvements du moignon de l'épaule dans le plan horizontal

Ces mouvements mettent en jeu **l'articulation scapulo-thoracique** (Fig. 14, 15, 16) :

a) **Position de référence** (Fig. 14) ;
b) **Rétroposition du moignon de l'épaule** (Fig. 15) ;
c) **Antéposition du moignon de l'épaule** (Fig. 16).
À noter que l'amplitude de l'antéposition est plus grande que celle de la rétroposition.

Mise en jeu musculaire :

- Antéposition : pectoralis major, pectoralis minor, serratus.
- Rétroposition : *rhomboïdeus*, *trapezius* (faisceau transversal), *latissimus dorsi*.

0 30°

RI

Fig. 11

RE

80°

Fig. 12

Fig. 13

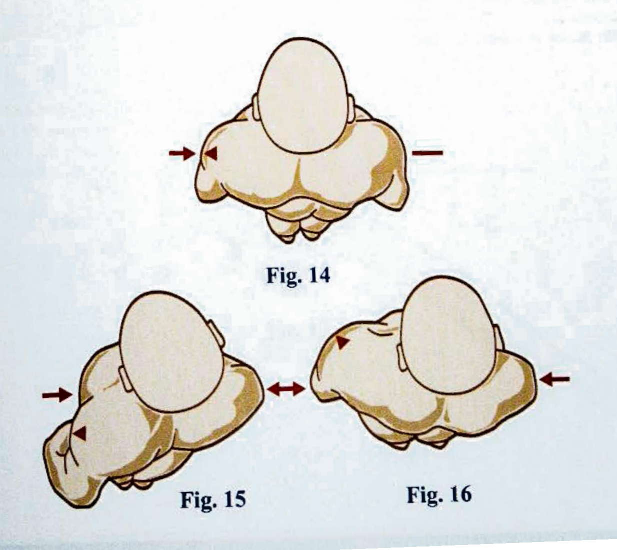


Fig. 14

Fig. 15

Fig. 16

Flexion-extension horizontale

C'est le mouvement du membre supérieur (Fig. 17, 18, 19) dans le plan horizontal (Plan C, Fig. 20) et autour d'un axe vertical, ou plus exactement d'une succession d'axes verticaux car le mouvement s'effectue non seulement dans la scapulo-humérale (Axe 4, Fig. 2) mais aussi dans la scapulo-thoracique.

a) **Position de référence** (Fig. 18) : le membre supérieur est en abduction 90°, dans le plan frontal, ce qui met en jeu les muscles suivants :

- *Deltoïdeus* (essentiellement le faisceau acromial III, Fig. 101) ;
- *Supra-spinatus* ;
- *Trapezius* : faisceaux supérieurs (acromial et claviculaire) et inférieur (tuberculaire), *serratus major*.

b) **Flexion horizontale** (Fig. 17), mouvement combinant la flexion et l'adduction de 140° d'amplitude, il met en jeu les muscles suivants :

- *Deltoïdeus* faisceaux antéro-interne I et antéro-externe II dans une proportion variable entre eux et avec le faisceau III ;
- *Infra-scapularis* ;
- *Pectoralis major* et *minor*, *serratus*.

c) **Extension horizontale** (Fig. 19), mouvement combinant l'extension et l'adduction d'amplitude plus limitée à 30-40°, il met en jeu les muscles suivants :

- *Deltoïdeus* faisceaux postéro-externes IV et V et postéro-internes VI et VII dans une proportion variable entre eux et avec le faisceau III ;
- *Supra-spinatus*, *infra-spinatus* ;
- *Teres major* et *minor*, *rhomboïdeus* ;
- *Trapezius* : faisceau épineux s'ajoutant aux deux autres ;
- *Latissimus dorsi* en antagonisme-synergie avec le *deltoïdeus* qui annule l'importante composante d'adduction du grand dorsal.

L'amplitude globale de ce mouvement de flexion-extension horizontale atteint presque 180°. De la position extrême antérieure à la position extrême postérieure on voit entrer en action successivement, comme lors d'une gamme sur un clavier, les différents faisceaux du *deltoïdeus* (p. 69) qui est bien le muscle principal de ce mouvement.

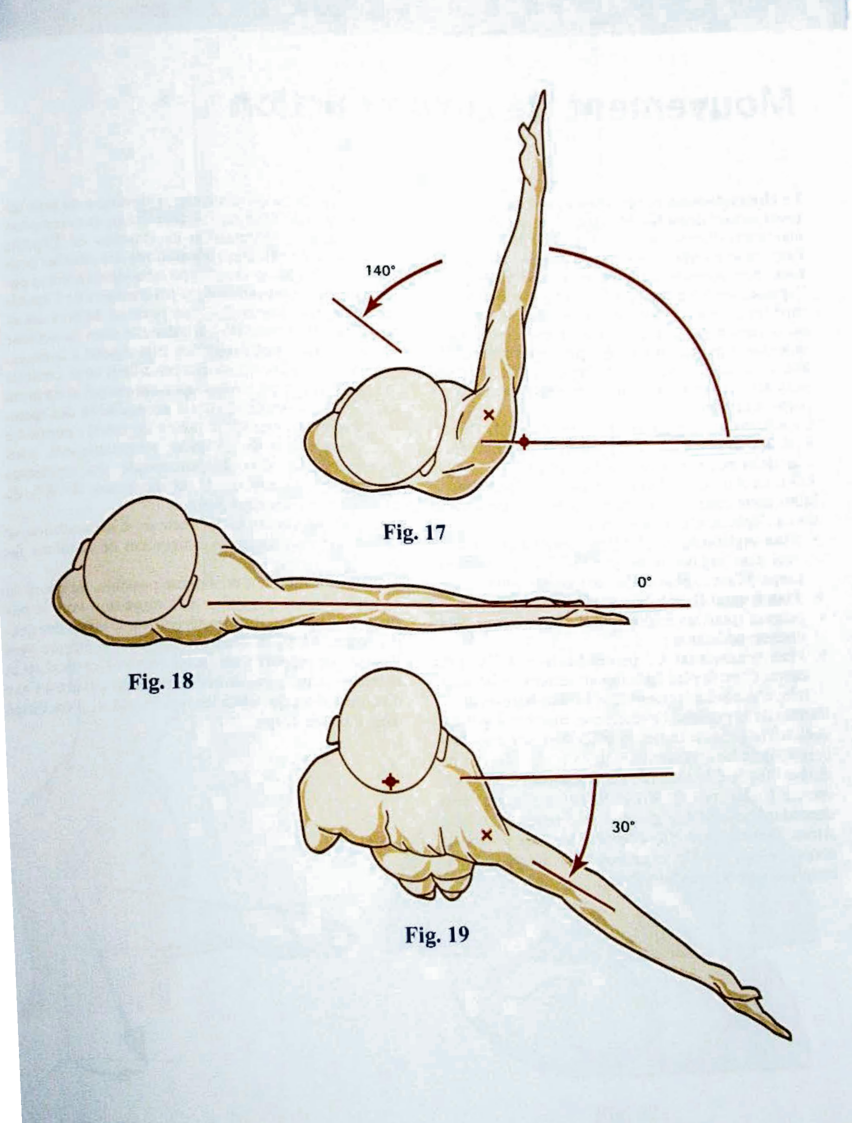


Fig. 17

Fig. 18

Fig. 19

Mouvement de circumduction

La **circumduction** combine les mouvements élémentaires autour des trois axes (Fig. 20), poussés à leur maximum d'amplitude. Le bras dessine alors dans l'espace une surface conique : le **cône de circumduction**. Son sommet est situé au centre théorique de l'épaule, son côté est égal à la longueur du membre supérieur, mais sa base, loin d'être un cône régulier, est déformée par la présence du tronc. Ce cône délimite dans l'espace un **secteur sphérique d'accessibilité**, à l'intérieur duquel la main peut saisir les objets, sans déplacement du tronc, pour éventuellement les porter à la bouche.
Le schéma montre en rouge la trajectoire de l'extrémité des doigts : c'est la base du cône de circumduction, déformée par la présence du corps.
Les trois plans de référence orthogonaux (perpendiculaires entre eux) se croisent en un point situé au centre de l'épaule. On les nomme :

- **Plan sagittal A**, ou plutôt para-sagittal, puisque le vrai plan sagittal passe par l'axe longitudinal du corps. C'est le plan de la flexion-extension ;
- **Plan frontal B**, parallèle au plan d'appui dorsal, ou *coronal* (pour les anglophones). C'est le plan d'abduction-adduction ;
- **Plan transversal C**, perpendiculaire à l'axe du corps. C'est le plan de la flexion-extension horizontale, c'est-à-dire restant dans le plan horizontal.

Partant de la position de référence, membre supérieur pendant le long du corps, la trajectoire parcourt successivement les secteurs III – II – VI – V – IV. À l'intérieur du cône, le membre supérieur peut explorer le secteur I. Les secteurs VII et VIII (non figurés) sont cependant accessibles grâce à la flexion du coude. Ainsi, la main peut-elle atteindre tous les points du corps, ce qui, pour le toilettage, nous avantage beaucoup par rapport aux animaux.

La flèche rouge qui prolonge la direction du bras indique l'axe du cône de circumduction, et correspond sensiblement à la position de fonction de l'épaule (Fig. 21), aussi **position d'équilibre** des muscles péri-articulaires, c'est pourquoi elle est adoptée comme **positon d'immobilisation** dans les fractures de l'épaule et du membre supérieur. Cette position du bras est située dans le secteur IV, qui mérite le nom de **secteur d'accessibilité préférentielle**. Elle répond à la nécessité de garder les mains qui travaillent sous contrôle de la vue (Fig. 22). Le recoupement partiel et en avant du tronc, des deux secteurs d'accessibilité des membres supérieurs obéit à la même nécessité : permettre aux deux mains de travailler simultanément, sous contrôle de la vision stéréoscopique, qui représente elle aussi le recoupement, sur un secteur de 90°, du champ visuel des deux yeux.
Les champs visuels et les secteurs d'accessibilité se recouvrent donc presque exactement de la même façon.
Cette disposition n'a été rendue possible, au cours de la phylogénèse, que grâce à la migration vers le bas du trou occipital qui est postérieur sur le crâne des quadrupèdes. Ainsi, la face se trouve être dirigée vers l'avant, par rapport à un rachis cervical vertical, et le regard peut avoir une direction perpendiculaire à l'axe du corps, alors que chez les quadrupèdes, il est dirigé dans l'axe du corps.

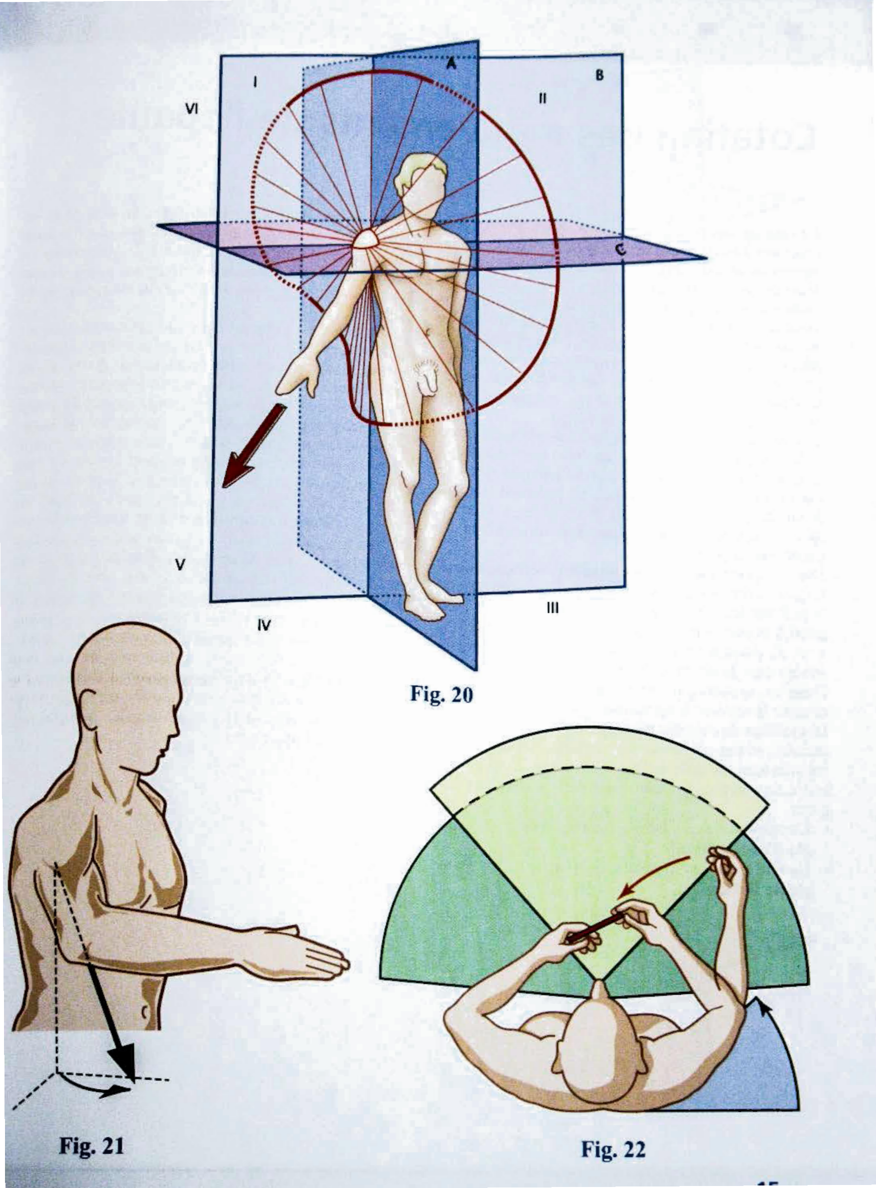


Fig. 20

Fig. 21

Fig. 22

Cotation des mouvements de l'épaule

La cotation des mouvements et des positions des articulations à trois axes et trois degrés de liberté, spécialement en ce qui concerne l'épaule, rencontre des difficultés en raison de certaines ambiguïtés. Par exemple, si l'on définit l'abduction comme un mouvement d'écartement du membre supérieur par rapport au plan de symétrie du corps, ceci n'est valable que jusqu'à 90°, car ensuite le membre supérieur se rapproche du plan de symétrie : on devrait alors parler d'adduction, ce qui n'est pas le cas, en pratique, pour respecter la continuité du mouvement.

La cotation de la rotation longitudinale est encore plus ardue. S'il est encore facile de coter un mouvement dans les plans de référence, cela devient plus difficile dans les secteurs intermédiaires. Il faudrait donner au moins deux coordonnées soit en utilisant un système de coordonnées rectangulaires, soit un système de coordonnées polaires.

Dans le **système de coordonnées rectangulaires** (Fig. 23), on mesure l'angle sous lequel se projette le bras **P** sur les trois plans de référence, frontal **F**, sagittal **S** et transversal **T**. Les coordonnées scalaires **X**, **Y** et **Z**, définissent sans ambiguïté le point **P** sur la sphère dont le centre coïncide avec celui de l'épaule. Dans ce système, il est impossible de prendre en compte la rotation longitudinale du bras.

Le **système de coordonnées polaires** (Fig. 24) ou azimutales, utilisé par les navigateurs, permet de coter la rotation longitudinale du bras. Comme sur le globe terrestre, la position du point **P** est définie par deux angles :

- L'angle α qui correspond à la **longitude** : c'est l'**angle d'antépulsion** ;
- L'angle β qui correspond à la **latitude** : c'est **l'angle de flexion**.

À noter que deux angles suffisent. Au lieu de β, on aurait pu prendre l'angle γ, projection dans le plan frontal, qui définit aussi la latitude. L'avantage de ce système est que grâce à l'angle ω, ou angle de cap dans la marine, on connaît la rotation longitudinale du bras.

Ce système est donc plus précis et plus complet que le premier ; c'est même le seul qui permette de représenter le cône de circumduction sous la forme d'une trajectoire fermée sur la surface de la sphère, comme le périple circulaire d'un navire sur la surface du globe. Cependant, sa complexité, pour un profane de la navigation fait qu'il n'est pas utilisé en pratique.

Il existe cependant un moyen de coter la rotation longitudinale du bras en n'importe quelle position par rapport à la position de référence, c'est d'utiliser l'artifice du **retour à la position de référence par le méridien** (Fig. 25) : à partir, par exemple, de la position du bras qui permet de se coiffer. On fait parcourir au coude le chemin vertical direct vers la position de référence, c'est-à-dire le méridien du point de départ. Si l'on a pris soin de n'effectuer aucune rotation volontaire du bras au cours de ce mouvement de descente, on se retrouve en position de référence où l'on peut coter la rotation longitudinale suivant les critères habituels : ici, elle est proche de la rotation externe maximum, c'est-à-dire 30°. C'est un artifice que j'ai personnellement mis au point.

Fig. 23

Fig. 25

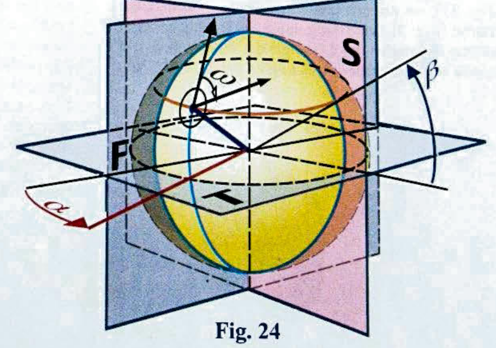


Fig. 24

Le « paradoxe » de Codman

La **manœuvre de Codman** (Fig. 26 à 30) s'effectue de la façon suivante :

- à partir de la position de référence (Fig. 26 profil et 27 face), membre supérieur pendant le long du corps, pouce en avant **Av** et paume en dedans ;
- le membre supérieur est d'abord porté en abduction de +180° (Fig. 28) ;
- partant de cette position verticale, la paume regardant en dehors, le membre supérieur effectue une extension de -180°, dans le plan sagittal (Fig. 29) ;
- il est ainsi ramené dans sa position initiale (Fig. 30) le long du corps, mais la paume « regarde » maintenant en dehors et le pouce est dirigé vers l'arrière. Ceci a été perçu comme un paradoxe par Codman, car comment expliquer que grâce à deux mouvements successifs d'abduction et d'extension, de 180° chacun, il se produise un changement d'orientation de la paume de 180° ?

En réalité, il s'agit d'une **rotation interne automatique** du membre supérieur sur son axe longitudinal, que **Mac Conaill** appelle **rotation conjointe**, telle qu'elle existe dans les articulations à deux axes et deux degrés de liberté. Elle s'explique par la **géométrie courbe**, comme l'a montré **Riemann**, sur une surface sphérique. Depuis **Euclide**, on sait que dans un plan, la somme des angles d'un triangle est égale à « deux droits », soit 180°. Si sur une sphère (une orange par exemple...) on découpe un triangle, formé par les deux méridiens 0 et 90°, et limité en bas par l'équateur (Fig. 31), on obtient une « pyramide » dont la base courbe (Fig. 32) est triangulaire, mais dans ce cas, la somme des angles de ce triangle est supérieure à 180°, puisqu'elle additionne trois angles droits, soit 270°.

Imaginez maintenant une **expérience de pensée**, tout à fait fantaisiste (Fig. 34), comme aimait à en faire Einstein : vous partez du pôle Sud, droit devant vous, vers le Nord, le long du méridien 90°. Parvenu au pôle Nord, vous redescendez vers le pôle Sud, en suivant le méridien 0°, mais sans tourner vous-même de 90°, en marchant « en crabe », sur le côté – ce qui, il faut bien l'avouer, est très mal commode pour parcourir 20 000 km ! En arrivant, après bien des efforts, au pôle Sud, vous vous retrouverez dos à dos avec votre position de départ : vous aurez effectué, sans vous en rendre compte, une rotation sur vous-même de 180° ! Et vous aurez ainsi expérimenté la rotation conjointe de Mac Conaill ! En **géométrie courbe**, c'est l'**addition de deux triangles tri-rectangles** (Fig. 33), dont la somme des angles de 6 fois 90° soit 540°, dépasse de 180° la valeur de 360° de la somme des angles des deux triangles, dans le plan ! Voilà donc d'où est sorti ce demi-tour que vous avez effectué sur vous-même ! Mais, normalement, l'épaule ne fonctionne pas de cette façon, car après deux cycles complets, elle devrait avoir « tourné » de 360°, ce qui est physiologiquement impossible. C'est pourquoi l'épaule, comme la hanche, est une articulation à trois axes, et trois degrés de liberté : elle possède une **rotation longitudinale volontaire**, celle que Mac Conaill appelle la **rotation adjointe**. Au total, l'épaule peut effectuer des **cycles successifs**, à l'infini, comme dans la natation, qu'on appelle **cycles ergonomiques**, parce qu'à chaque instant, sa rotation adjointe compense et annule sa rotation conjointe. Le « paradoxe » de Codman n'apparaît que lorsque l'épaule est utilisée comme une articulation à deux axes, où la rotation adjointe ne vient pas compenser la rotation conjointe.
On peut donc dire que le Paradoxe de Codman est un faux paradoxe... Et l'on comprend alors pourquoi les articulations de la racine des membres comportent trois degrés de liberté, afin de ne pas être limitées par la rotation conjointe lors de l'orientation du membre dans l'espace.

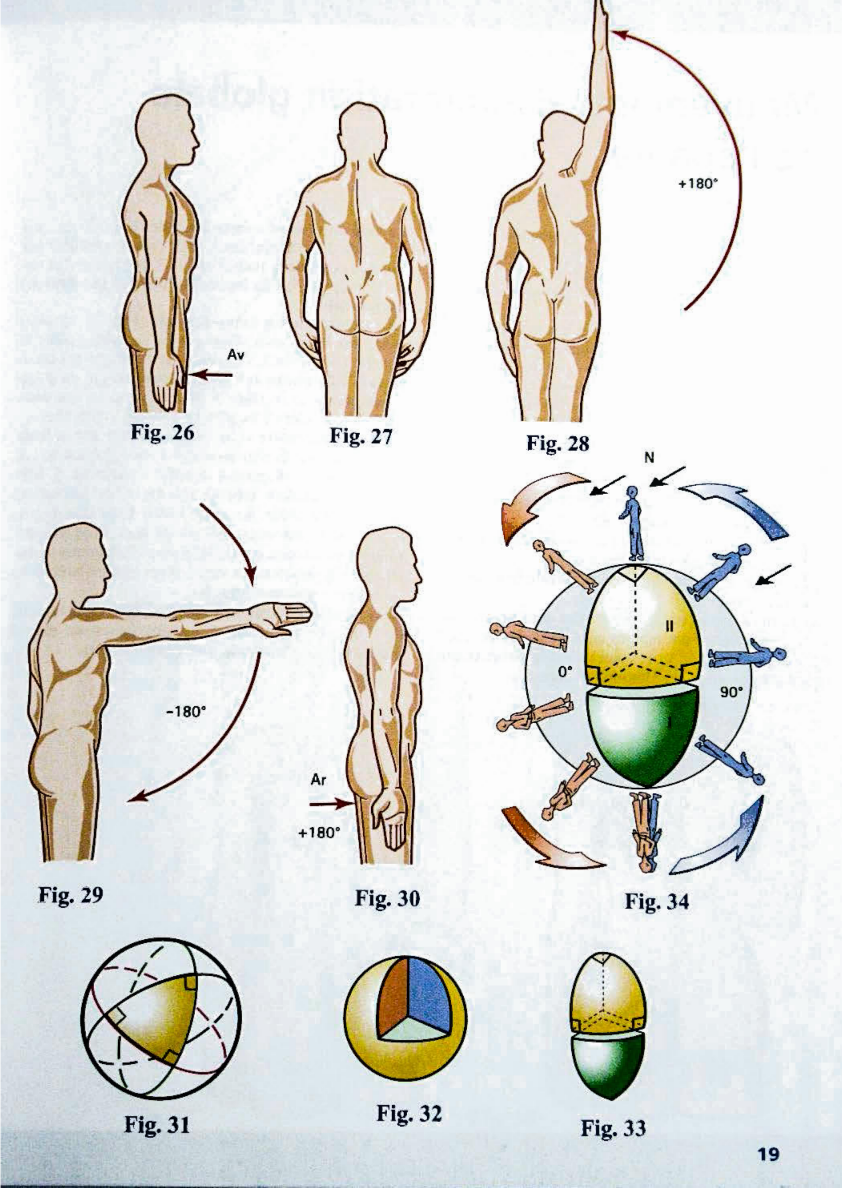


Fig. 26
Fig. 27
Fig. 28
Fig. 29
Fig. 30
Fig. 34
Fig. 31
Fig. 32
Fig. 33

Mouvements d'exploration globale de l'épaule

En pratique, certains mouvements permettent de faire une bonne évaluation de la fonction de l'épaule, mouvements de la vie courante comme se coiffer, enfiler la manche d'une veste ou d'un pardessus, se gratter la nuque ou le dos…

Cependant, il est possible d'utiliser une manœuvre, les anglophones diraient un test : l'**épreuve du point triple** ou « *triple point test* ». Cette épreuve découle de la constatation que, chez le sujet normal, la main peut atteindre sur la face postérieure de l'omoplate opposée **un point triple** par trois voies différentes (Fig. 35).

Ce schéma figure en pointillés bleus la trajectoire de la circumduction et les trois familles de trajectoires possibles pour atteindre le point triple :

- En bleu clair, la **voie antérieure contro-latérale C**, passant par le côté opposé de la tête ;
- En vert, la **voie antérieure homo-latérale H**, passant du même côté que l'épaule ;
- En rouge, la voie postérieure **P**, directement vers le dos, du même côté.

Les points atteints par l'extrémité des doigts dans chacune de ces voies sont repérés en cinq stades, le stade **5** étant commun aux trois voies : c'est le **point triple** (point rouge), situé sur l'omoplate opposée.

La **voie antérieure contro-latérale** (Fig. 36 : de face et 38 : de dos) commence à la bouche 1, continue sur l'oreille opposée **2**, puis la nuque **3**, le trapèze **4** et enfin l'omoplate **5**. **Elle évalue l'adduction (ou flexion) horizontale**.

La **voie antérieure homo-latérale** (Fig. 37 : de dos) passe par les mêmes stades, mais du même côté : la bouche **1**, l'oreille **2**, la nuque **3**, le trapèze **4** et l'omoplate **5**. **Elle évalue la rotation externe**, qui est à son maximum pour le stade **5**. Sur ce schéma, les deux voies homo-latérale et postérieure sont combinées.

La **voie postérieure** (Fig. 38) commence sur la fesse **1**, continue sur la région sacrée **2**, puis les lombes **3**, la pointe de l'omoplate **4** et enfin l'omoplate **5**. **Elle évalue la rotation interne** qui est à son maximum pour le point triple. Le stade initial **1** est très important : c'est le minimum nécessaire pour l'hygiène périnéale postérieure, qui conditionne l'autonomie du sujet. Sur ce schéma, les deux voies contro-latérale et postérieure sont combinées.

Le résultat de cette épreuve dépend, bien évidemment, de l'intégrité du coude. C'est donc aussi un moyen d'exploration globale du membre supérieur.

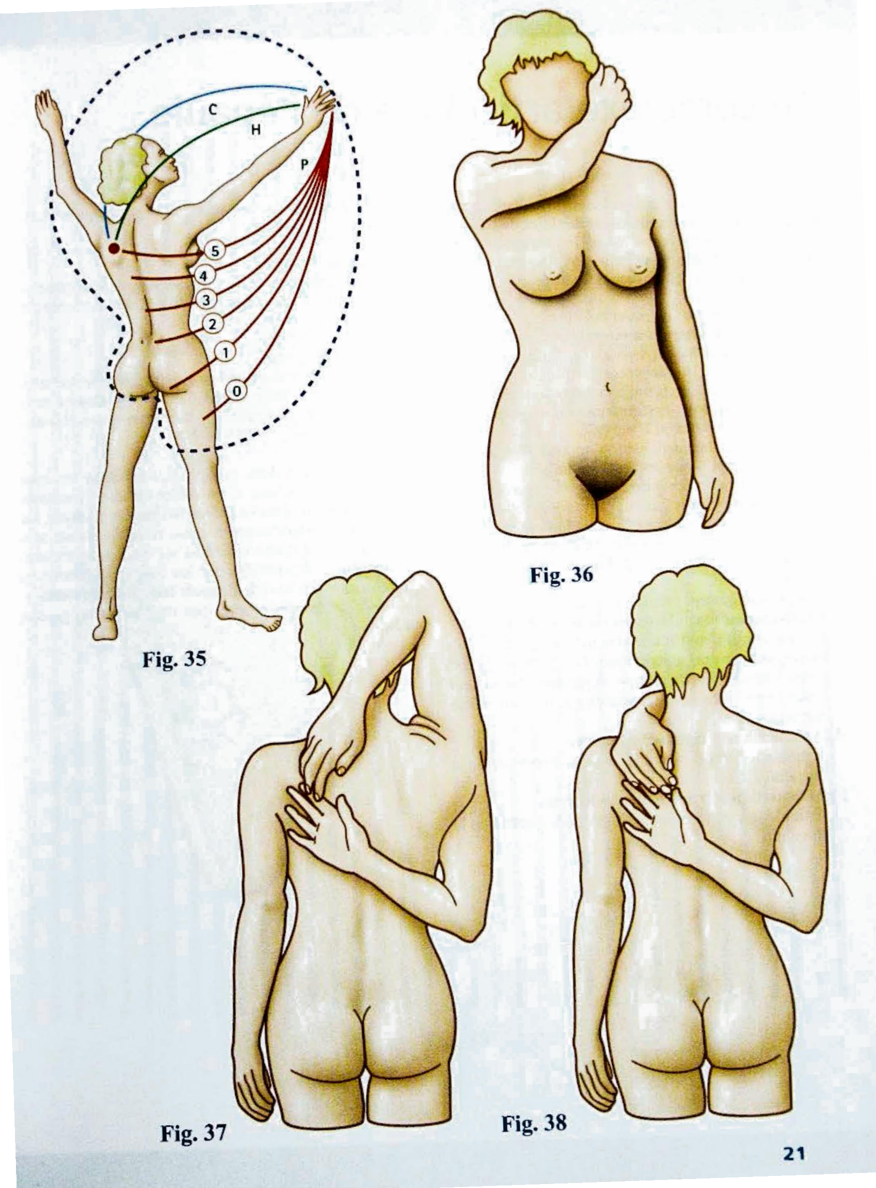


Fig. 35

Fig. 36

Fig. 37

Fig. 38

Le complexe articulaire de l'épaule

L'épaule ne comporte pas une seule articulation, mais **cinq** qui forment **le complexe articulaire de l'épaule** (Fig. 39), dont nous venons de définir les mouvements au niveau du membre supérieur. Ces cinq articulations se répartissent en deux groupes :

- **Premier groupe** : deux articulations :

1) **Articulation scapulo-humérale**
Articulation vraie au sens anatomique (contact de deux surfaces de glissement cartilagineuses).
C'est l'articulation la plus importante de ce groupe.
2) **Articulation sous-deltoïdienne** ou « deuxième articulation de l'épaule »
Ce n'est pas une articulation au sens anatomique ; c'est cependant une articulation au sens physiologique, car elle comporte deux surfaces glissant l'une par rapport à l'autre. Cette sous-deltoïdienne est mécaniquement liée à la scapulo-humérale : tout mouvement dans la scapulo-humérale entraîne un mouvement dans la sous-deltoïdienne.

- **Deuxième groupe** : trois articulations :

3) **Articulation scapulo-thoracique**
Là encore, il s'agit d'une articulation au sens physiologique et non anatomique. C'est l'articulation la plus importante du groupe, cependant elle ne peut fonctionner sans les deux autres qui lui sont mécaniquement liées.
4) **Articulation acromio-claviculaire**
Articulation vraie, située à l'extrémité externe de la clavicule.
5) **Articulation sterno-costo-claviculaire**
Articulation vraie située à l'extrémité interne de la clavicule.

Au total, on peut schématiser ainsi le complexe articulaire de l'épaule :

- **Premier groupe** :
Une articulation vraie et principale : la scapulo-humérale et une articulation « fausse » et associée : la sous-deltoïdienne.

- **Deuxième groupe** :
Une articulation « fausse » et principale : la scapulo-thoracique et deux articulations vraies et associées : l'acromio-claviculaire et la sterno-costo-claviculaire.

Dans chacun des deux groupes, les articulations sont mécaniquement liées, c'est-à-dire qu'elles fonctionnent obligatoirement en même temps. En pratique, les deux groupes fonctionnent aussi simultanément, suivant des proportions variables au cours des mouvements. On peut donc dire que les cinq articulations du complexe articulaire de l'épaule fonctionnent simultanément et dans des proportions variables d'un groupe à l'autre.

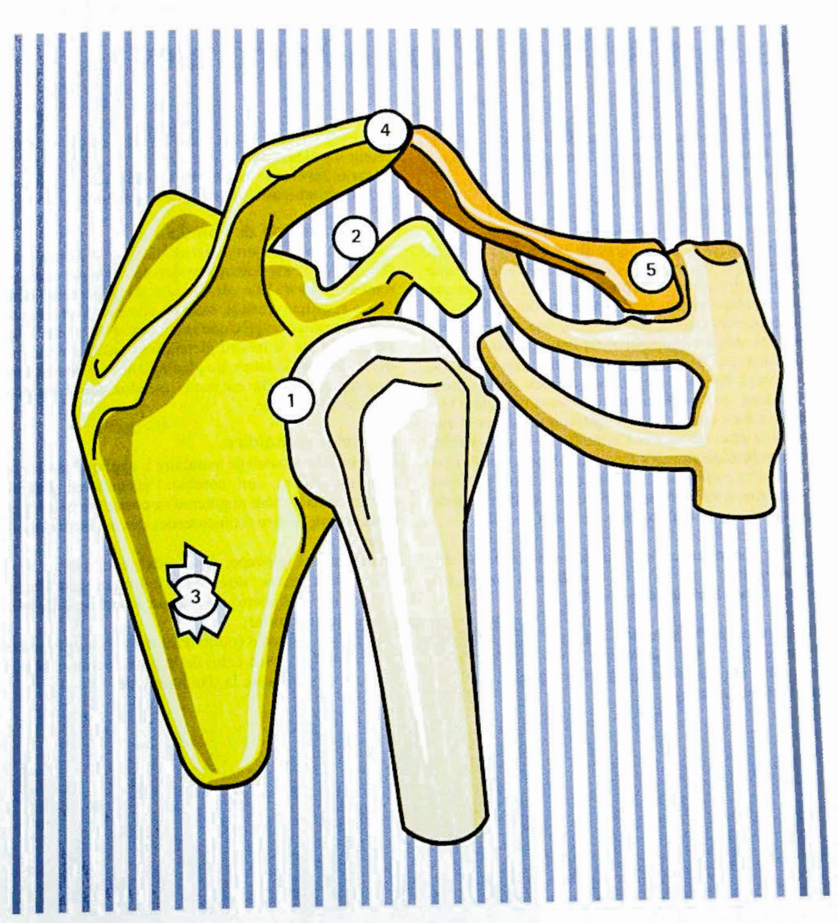


Fig. 39

Les surfaces articulaires de l'articulation scapulo-humérale

Surfaces sphériques, caractéristiques d'une énarthrose, donc articulation à trois axes et à trois degrés de liberté (Fig. 18).

Tête humérale

Orientée en haut, en dedans et en arrière (Fig. 40), on l'assimile à un tiers de sphère de 30 mm de rayon. En réalité, cette sphère est loin d'être régulière puisque son diamètre vertical est plus grand de 3 à 4 mm que son diamètre antéro-postérieur. En outre, sur une coupe vertico-frontale, on constate que son rayon de courbure décroît légèrement de haut en bas et qu'il existe non pas un centre de courbure, mais une série de centres de courbure alignés suivant une spirale. C'est donc lorsque la partie supérieure de la tête humérale est en contact avec la glène que la zone d'appui est la plus étendue et l'articulation la plus stable, d'autant plus qu'alors les faisceaux moyen et inférieur du ligament gléno-huméral sont tendus. Cette position d'abduction à 90° correspond à la position de verrouillage ou *close-packed position* de Mac Conaill.

Son axe forme avec l'axe diaphysaire un angle dit « d'inclinaison » de 135°, et, avec le plan frontal, un angle dit « de déclinaison » de 30°.

Elle est séparée du reste de l'épiphyse supérieure de l'humérus par le col anatomique, dont le plan est incliné à 45° sur l'horizontale (angle supplémentaire de l'angle d'inclinaison).

Elle est flanquée de deux saillies sur lesquelles s'insèrent les muscles péri-articulaires :

- Petite tubérosité ou trochin en avant ;
- Grosse tubérosité ou trochiter en dehors.

Cavité glénoïde de l'omoplate

Située à l'angle supéro-externe du corps de l'omoplate (Fig. 41), elle est orientée en dehors, en avant et légèrement en haut. Elle est concave dans les deux sens (vertical et transversal), mais sa concavité est irrégulière et moins marquée que la convexité de la tête. Elle est bordée par le rebord glénoïdien, saillant, mais interrompu par l'échancrure glénoïdienne à sa partie antéro-supérieure. Elle est moins étendue que la surface de la tête humérale.

Bourrelet glénoïdien

C'est un fibro-cartilage annulaire **b** appliqué sur le rebord glénoïdien, qui comble l'échancrure glénoïdienne, mais surtout augmente sa concavité et rétablit ainsi la congruence (coïncidence) des surfaces articulaires.

Triangulaire à la coupe, il possède trois faces :

- Une face interne, insérée sur le rebord glénoïdien ;
- Une face périphérique donnant insertion à des fibres de la capsule ;
- Une face centrale (ou axiale) dont le cartilage est en continuité avec celui de la glène osseuse, et qui est en contact avec la tête humérale.

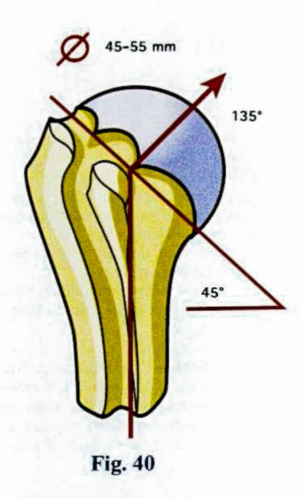


Fig. 40

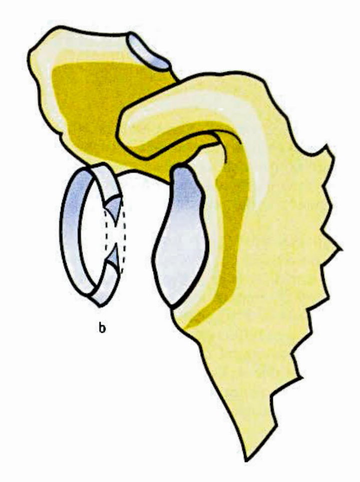


Fig. 41

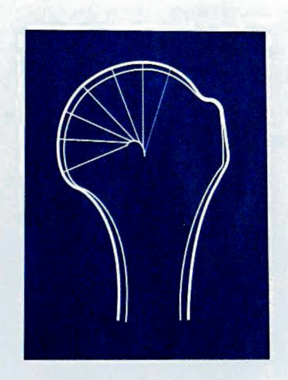


Fig. 42

Centres instantanés de rotation

Le centre de courbure d'une surface articulaire ne coïncide pas obligatoirement avec le centre de rotation car, outre la forme de la surface, interviennent le jeu mécanique de l'articulation, la tension des ligaments et la contraction des muscles.

En ce qui concerne la **tête humérale**, il n'existe pas, comme on a pu le croire longtemps en assimilant sa forme à une portion de sphère, un centre fixe et immuable lors du mouvement mais, comme l'ont montré les travaux de Fischer et coll., une série de centres instantanés de rotation (C.I.R.) qui correspondent au centre du mouvement effectué entre deux positions très proches l'une de l'autre. Ces points sont déterminés par analyse sur ordinateur sur une série de radiographies successives.

Ainsi, lors du mouvement d'abduction, considéré comme plan, c'est-à-dire en ne conservant que la composante de rotation de l'humérus dans le plan frontal, il existe deux groupements de C.I.R. (Fig. 43 : tête humérale de face) entre lesquels apparaît une discontinuité 3-4 jusqu'ici encore inexpliquée de façon certaine. Le premier groupement se situe dans un « cercle de dispersion » C_1 situé près de la partie inféro-interne de la tête humérale, dont le centre est le barycentre des C.I.R. et dont le rayon est la moyenne des distances du barycentre à chaque C.I.R. Le deuxième groupement se trouve dans un autre « centre de dispersion » C_2, situé dans la moitié supérieure de la tête. Les deux cercles sont séparés par la discontinuité.

Pour le mouvement **d'abduction**, la scapulo-humérale peut alors être assimilée (Fig. 44 : tête humérale de face) à deux articulations :

- Lors du début du mouvement jusqu'à 50°, la rotation de la tête humérale s'effectue autour d'un point situé quelque part dans le cercle C_1 ;
- Lors de la fin de l'abduction de 50 à 90°, le centre de rotation est situé dans le cercle C_2 ;
- Autour de 50° se produit la discontinuité du mouvement dont le centre se situe nettement en haut et en dedans de la tête.

Lors du mouvement de **flexion** (Fig. 45 : vue externe) la même analyse montre qu'il n'y a pas de discontinuité notable dans la trajectoire des C.I.R., ce qui correspond à un seul « cercle de dispersion » centré à la partie inférieure de la tête à égale distance des deux bords.

Enfin, lors du mouvement de **rotation longitudinale** (Fig. 46 : vue supérieure), le « nuage » ou cercle de dispersion se situe à l'aplomb de la corticale diaphysaire interne et à égale distance des deux bords de la tête.

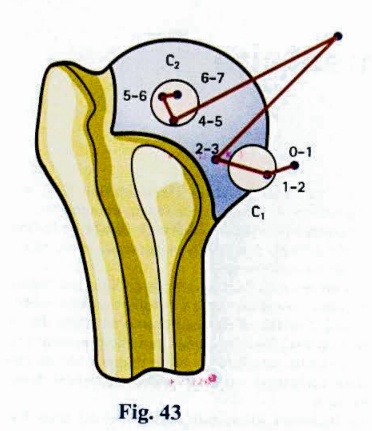


Fig. 43

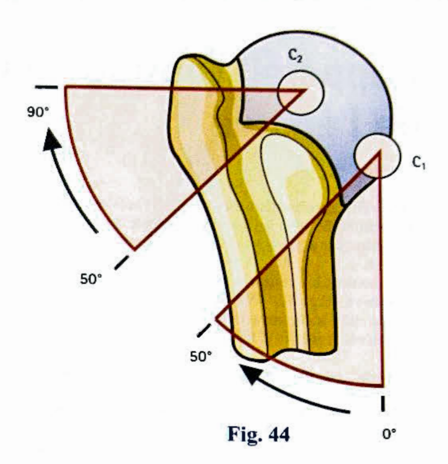


Fig. 44



Fig. 45

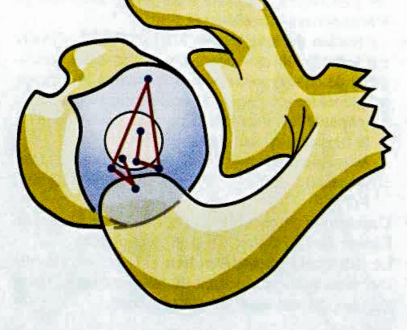


Fig. 46

L'appareil capsulo-ligamentaire de l'épaule

L'appareil capsulo-ligamentaire de l'épaule est suffisamment lâche pour permettre sa grande mobilité. Il n'est donc pas suffisant, à lui seul, pour assurer sa coaptation.

Pour montrer les **surfaces articulaires et l'appareil capsulaire** (Fig. 47, 48, 49, 50, d'après Rouvière), l'articulation a été ouverte et les deux parties ont été retournées de part et d'autre :

La **vue interne de l'extrémité supérieure de l'humérus** (Fig. 47) montre :

- La **tête humérale**, entourée d'une **collerette capsulaire 1** sur laquelle
- Les ***frenula capsulæ* 2**, soulèvent des replis sous son pôle inférieur ;
- Le **faisceau supérieur du ligament gléno-huméral 4** épaissit la capsule dans sa partie supérieure ;
- Le tendon du *caput longum* du *biceps brachii* **3** (long biceps) apparaît sectionné ;
- De même, le **tendon du *subscapularis* 5** (sous-scapulaire) a été sectionné près de son insertion trochinienne.

La **vue externe de l'omoplate** (Fig. 48) montre :

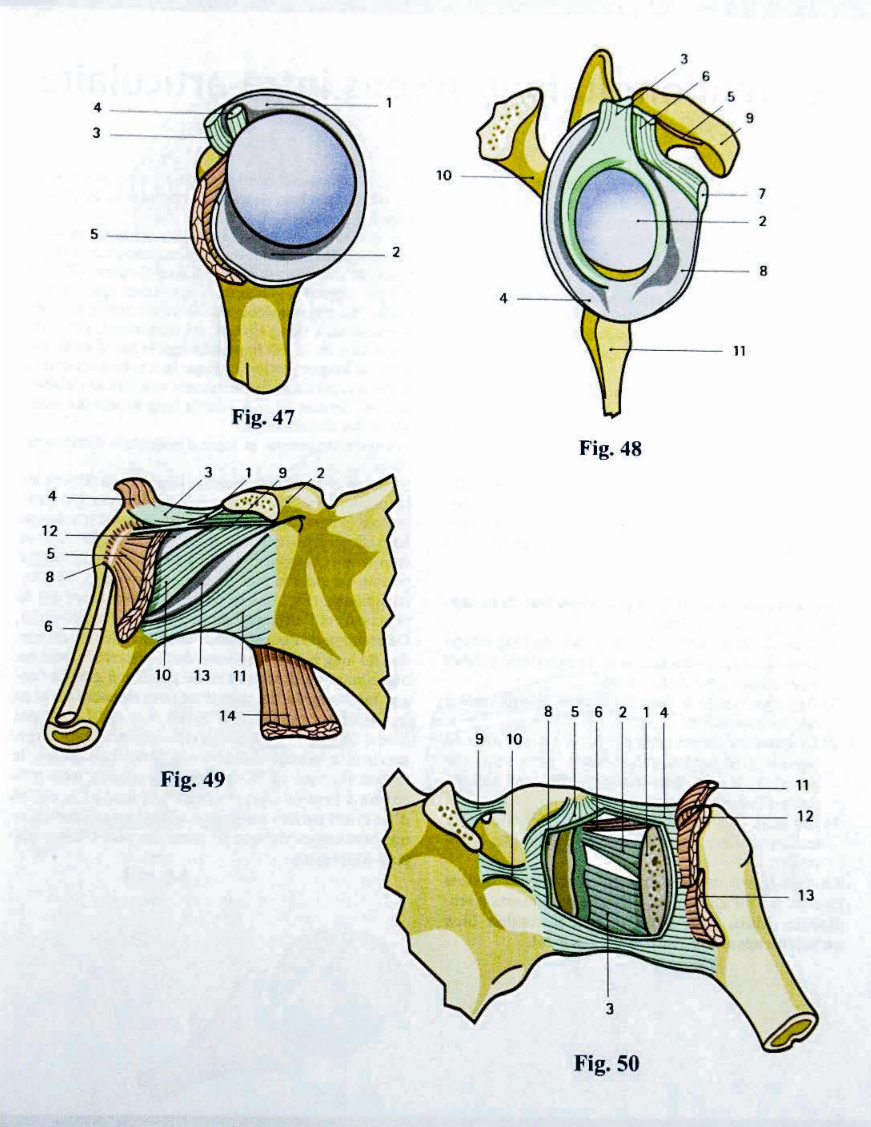
- La **cavité glénoïde 2**, entourée du *labrum* (bourrelet glénoïdien), qui passe « en pont » au-dessus de **l'échancrure glénoïdienne** ;
- Le **tendon du long biceps 3**, ici sectionné, s'insère sur le tubercule sus-glénoïdien et, par deux contingents de fibres, participe à la formation du bourrelet glénoïdien. Ce tendon est donc intra-capsulaire ;
- La **capsule 8** est renforcée par des ligaments :
  - le ligament coraco-huméral **7** ;
  - le ligament gléno-huméral (Fig. 49) avec ses trois faisceaux : supérieur **9**, moyen **10**, et inférieur **11** ;
- L'**apophyse coracoïde** se profile en arrière-plan, l'épine de l'omoplate **10** a été sectionnée ;
- **Le tubercule sous-glénoïdien (11,** Fig. 48) donne insertion au *caput longum* du *triceps brachii* (long triceps), qui est ainsi extra-capsulaire.

Sur une **vue antérieure de l'articulation** (Fig. 49), les ligaments antérieurs apparaissent clairement :

- Le **ligament coraco-huméral 3**, étendu de la coracoïde **2** au trochiter, où s'insère aussi le *supra-spinatus* **4** (sus-épineux) ;
- L'écart entre les deux insertions du ligament coraco-huméral, constitue, avec l'échancrure inter-tubérositaire, l'**orifice d'entrée intra-articulaire** du tendon du long biceps 6, après son cheminement dans la gouttière inter-tubérositaire transformée en **coulisse bicipitale** par le **ligament huméral transverse 6** ;
- Le **ligament gléno-huméral**, avec ses trois faisceaux : supérieur **1**, sus-gléno-sus-huméral, moyen **10**, sus-gléno-pré-huméral et inférieur **11**, pré-gléno-sous-huméral. L'ensemble dessine un Z étalé à la face antérieure de la capsule. Entre ces trois faisceaux, on décrit **deux points faibles :**
  - le **foramen de Weitbrecht 12** ;
  - et le **foramen de Rouvière 13** ;
  - le **tendon du long triceps 14**.

Une **vue postérieure de l'articulation ouverte** (Fig. 50), montre parfaitement les ligaments, après résection de la tête humérale. La laxité capsulaire permet, sur le cadavre, d'écarter les surfaces articulaires d'au moins 3 cm :

- Les faisceaux moyen **2** et inférieur **3** du ligament gléno-huméral sont vus par leur face profonde. Tout en haut, se situe le **faisceau supérieur**, ainsi que le **ligament coraco-huméral 4**, auquel est annexé le **ligament coraco-glénoïdien** (non figuré), sans rôle mécanique ;
- À la partie haute passe la **partie intra-articulaire du tendon du long biceps 6** ;
- En dedans apparaît la **cavité glénoïde 7**, renforcée du **bourrelet glénoïdien 8** ;
- En dehors, sur le **trochiter** s'insèrent les trois muscles péri-articulaires postérieurs :
  - le *supra-spinatus* **11** (sus-épineux) ;
  - l'*infra-spinatus* **12** (sous-épineux) et ;
  - le *teres minor* **13** (petit rond).


4
3
1
5
2
Fig. 47
3
6
5
9
10
7
2
8
4
11
Fig. 48
3
1
9
2
4
12
5
8
6
10
13
11
14
Fig. 49
8
5
6
2
1
4
9
10
11
12
13
3
Fig. 50

Le tendon du long biceps intra-articulaire

Sur une coupe frontale de l'articulation scapulo-humérale (Fig. 51, d'après Rouvière) on peut voir :

- Les irrégularités de la cavité glénoïde osseuse sont noyées dans le cartilage glénoïdien **1** ;
- Le bourrelet glénoïdien **2** approfondit la cavité glénoïde ; cependant l'emboîtement de cette articulation est faible, ce qui explique la fréquence des luxations. Dans sa partie supérieure **3** le bourrelet glénoïdien n'est pas complètement fixé : son bord central tranchant est libre dans la cavité à la manière d'un ménisque ;
- Dans la position de référence, la partie supérieure de la capsule **4** est tendue, alors que l'inférieure **5** est plissée : ce « lâche » capsulaire et le « déroulement » des *frenula capsulae* **6** permettent l'abduction ;
- Le tendon de la longue portion du biceps **7** s'insère sur le tubercule sus-glénoïdien et sur le pôle supérieur du bourrelet glénoïdien. Pour sortir de l'articulation par l'échancrure inter-tubérositaire **8**, il glisse sous la capsule **4**.

Sur une coupe sagittale du pôle supérieur de la capsule (Fig. 52), on distingue :

- Dans la cavité articulaire, le tendon du long biceps peut contracter rapports avec la synoviale suivant trois dispositions différentes :

1) Appliqué contre la **face profonde de la capsule c** par la synoviale **s** ;
2) La synoviale forme deux petits culs-de-sac entre la capsule et le tendon qui se trouve ainsi relié à la capsule par une fine cloison synoviale appelée **méso-tendon** ;
3) Les deux culs-de-sac se sont rejoints et effacés, le tendon est libre, mais entouré par un feuillet synovial.

En règle, ces trois dispositions s'observent de dedans en dehors à mesure qu'on s'éloigne de l'insertion tendineuse. **Mais, dans tous les cas, le tendon bien qu'intra-capsulaire reste extra-synovial.**

On sait maintenant que le tendon du long biceps joue **un rôle important dans la physiologie et la pathologie de l'épaule.**

Lorsque le biceps se contracte pour soulever un objet lourd, ses deux chefs assurent simultanément la coaptation de l'épaule : la courte portion soulève l'humérus par rapport à l'omoplate en prenant appui sur la coracoïde, elle empêche ainsi avec les autres muscles longitudinaux (long triceps, coracobrachial, deltoïde) la luxation de la tête humérale vers le bas. Simultanément, la longue portion applique la tête humérale dans la glène ; ceci est particulièrement vrai lors de l'abduction de l'épaule (Fig. 53) car le long biceps fait aussi partie des abducteurs.

Lorsqu'il est rompu, la force d'abduction diminue de 20 %.

Le degré de tension initiale du long biceps dépend de la longueur du chemin parcouru dans sa portion horizontale intra-articulaire. Cette longueur est maximum en position intermédiaire (Fig. 56 vue supérieure) et en rotation externe (Fig. 54) : l'efficacité de la longue portion est alors la plus grande. Au contraire, en rotation interne (Fig. 55) le trajet intra-articulaire est le plus court et l'efficacité du long biceps est minimum.

On comprend aussi, en considérant la réflexion du tendon du long biceps au niveau de l'échancrure inter-tubérositaire, qu'il subisse en ce point une grande fatigue mécanique à laquelle il ne peut résister que si sa trophicité est excellente d'autant plus qu'il n'est pas doté d'un sésamoïde en ce point critique. Si avec l'âge, survient la dégénérescence des fibres collagènes, le tendon finit par se rompre dans sa portion intra-articulaire à l'entrée de la coulisse bicipitale à l'occasion d'un effort parfois minime, réalisant un tableau clinique bien caractéristique au cours des périarthrites scapulo-humérales.

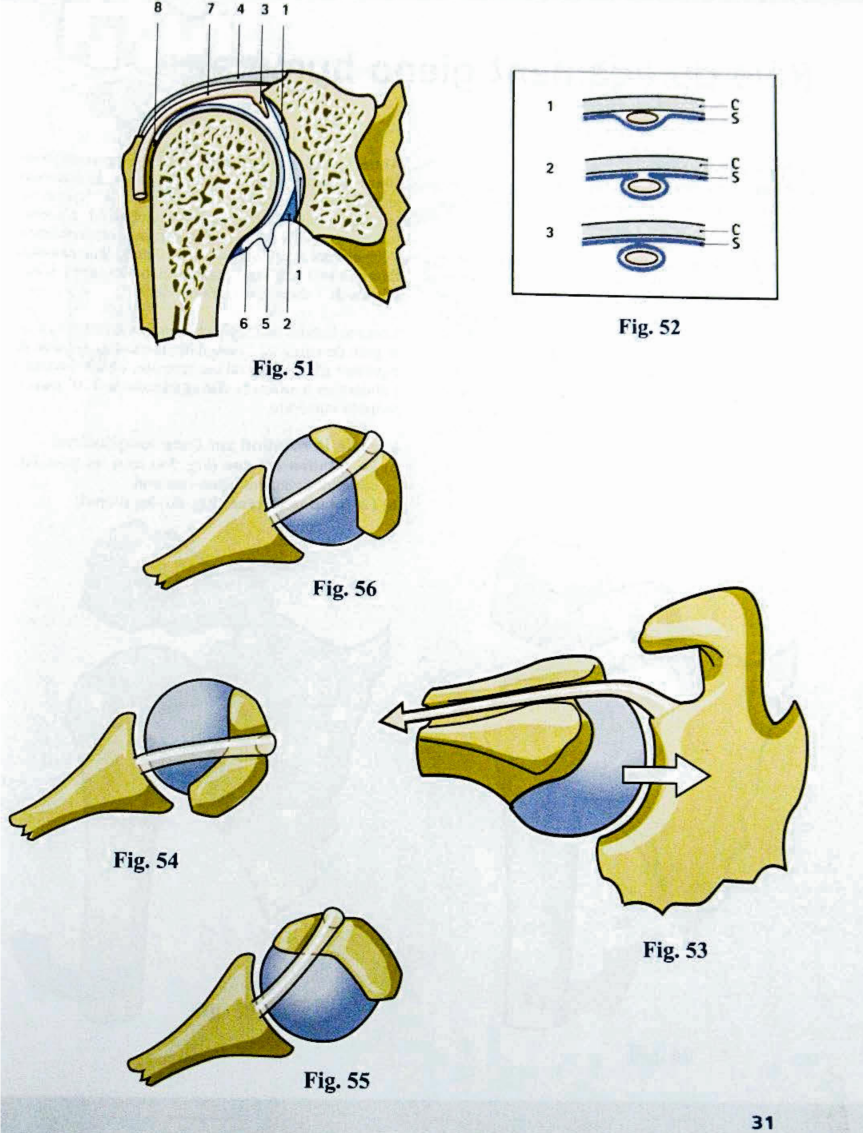


Fig. 51

Fig. 52

Fig. 56

Fig. 54

Fig. 53

Fig. 55

Rôle du ligament gléno-huméral

Lors de l'abduction

a) **Position de référence** (Fig. 57): les faisceaux moyen (vert clair) et inférieur (vert foncé) du ligament.

b) Lors de l'**abduction** (Fig. 58), on voit se tendre les faisceaux moyen et inférieur du ligament gléno-huméral, tandis que le faisceau supérieur et le ligament coraco-huméral - non figurés ici - se détendent. La tension maximum des ligaments, associée à la plus grande surface possible de contact des cartilages articulaires (le rayon de courbure de la tête humérale est légèrement plus grand en haut qu'en bas) fait de l'abduction la position de verrouillage de l'épaule, la *close-packed position* de Mac Conaill.

Autre facteur de limitation, le trochiter vient buter contre la partie supérieure de la glène et du bourrelet glénoïdien. Cette butée est retardée par la rotation externe qui efface le trochiter en arrière en fin d'abduction, présente sous la voûte acromio-coracoïdienne l'échancrure intertubérositaire et détend légèrement le faisceau inférieur du ligament gléno-huméral. L'amplitude de l'abduction est alors de 90°.

Lorsque l'abduction s'effectue en flexion de 30°, dans le plan du corps de l'omoplate, la mise en tension du ligament gléno-buméral est retardée, ce qui permet à l'abduction d'atteindre une amplitude de 110° dans la scapulo-humérale.

Lors de la rotation sur l'axe longitudinal

a) **La rotation externe** (Fig. 59) tend les trois faisceaux du ligament gléno-huméral.

b) **La rotation interne** (Fig. 60) les détend.

Fig. 57

Fig. 58

Fig. 59

Fig. 60

Le ligament coraco-huméral dans la flexion-extension

Sur une vue schématique externe de la scapulo-humérale, on voit la tension relative des deux faisceaux du ligament coraco-huméral :

a) **Position de référence** (Fig. 61) montrant le ligament coraco-huméral avec ses deux faisceaux trochitérien (vert foncé) en arrière et trochinien (vert clair) en avant.

b) Lors de **l'extension** (Fig. 62), la tension prédomine sur le faisceau trochinien.

c) Lors de la **flexion** (Fig. 63), la tension prédomine sur le faisceau trochitérien.

La rotation interne de l'humérus survenant en fin de flexion détend les ligaments coraco et gléno-huméraux et permet une plus grande amplitude du mouvement.

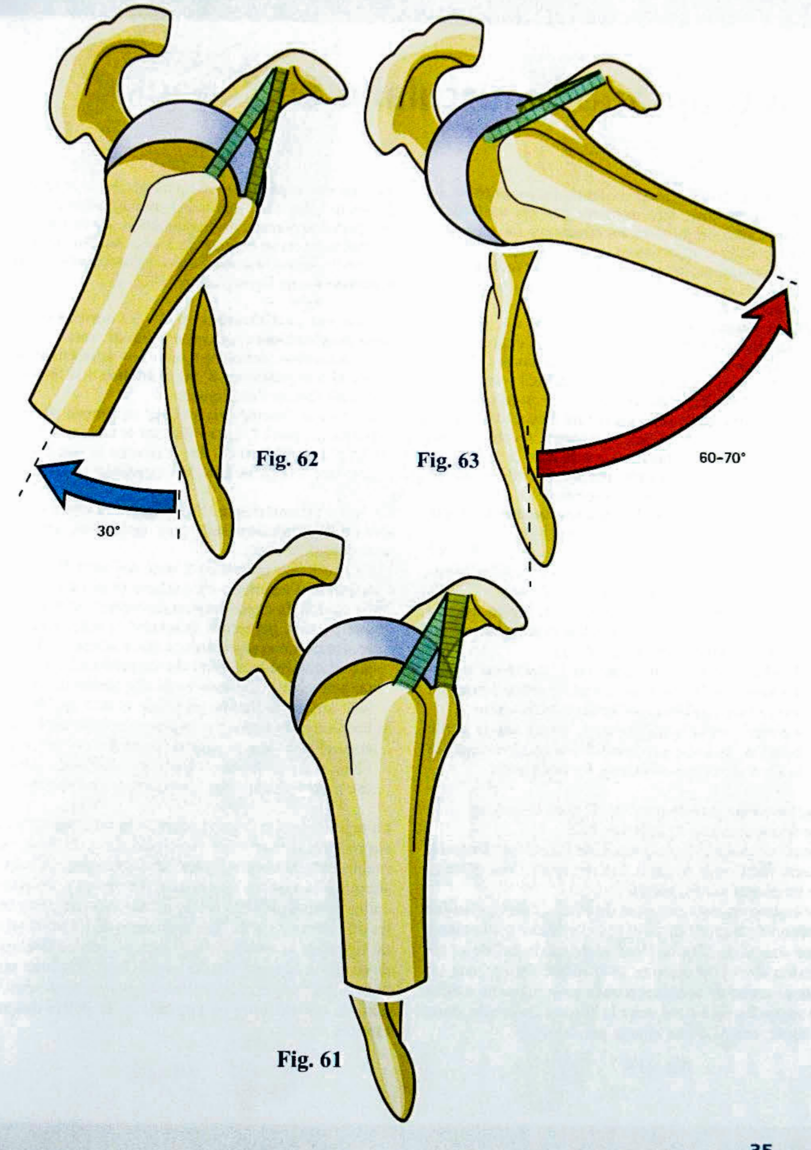


Fig. 62

Fig. 63

Fig. 61

La coaptation musculaire de l'épaule

En raison de sa grande mobilité, **la coaptation de l'épaule ne peut être assumée par les seuls ligaments** : l'action de **muscles coapteurs** lui est indispensable. Ils se répartissent en deux groupes :

1) Les **coapteurs transversaux**, qui du fait de leur direction, appliquent la tête humérale sur la glène de l'omoplate (Fig. 64, 65, 66) ;
2) Les **coapteurs longitudinaux** (Fig. 67, 68), qui soutiennent le membre supérieur et s'opposent à la luxation vers le bas lors du port de lourdes charges supportées par la main : ils « ramènent » la tête humérale en face de la glène. Le **syndrome de « l'épaule ballante »** est réalisé lorsqu'ils sont insuffisants ou paralysés. Par contre, lorsqu'ils sont prédominants, la luxation vers le haut de la tête humérale est contrecarrée par l'action de « recentrage » des coapteurs transversaux.

Il existe donc une **relation d'antagonisme-synergie** entre ces deux groupes musculaires.

Sur une **vue postérieure** (Fig. 64), les **muscles coapteurs transversaux** sont au nombre de trois :

1) Le *supra-spinatus* (sus-épineux) **1**, inséré dans la fosse sus-épineuse de l'omoplate et se terminant sur la facette supérieure du trochiter ;
2) L'*infra-spinatus* (sous-épineux) **3**, inséré sur la partie haute de la fosse sus-épineuse, et se terminant sur la facette postéro-supérieure du trochiter ;
3) Le *teres minor* (petit rond) **4**, inséré sur la partie basse de la fosse sus-épineuse, et se terminant sur la facette postéro-inférieure du trochiter.

Sur une **vue antérieure** (Fig. 65), on distingue :
Le *supra-spinatus* **1**, déjà vu ;
Le *subscapularis* (sous-scapulaire) **2**, muscle puissant, inséré dans toute la fosse antérieure de l'omoplate et se terminant sur le trochin ;
Le tendon du *caput longum* du *biceps brachii* (longue portion du biceps brachial) **5**, qui s'insère sur le tubercule sus-glénoïdien de l'omoplate, et du fait de sa réflexion dans l'échancrure inter-tubérositaire, joue un rôle essentiel de coaptation transversale, par un **« effet de rappel »** simultané avec la flexion du coude, donc le soulèvement d'une charge par la main.

Sur une **vue supérieure** (Fig. 66), les muscles précédemment cités sont retrouvés : *supra-spinatus* (sus-épineux) **1** au-dessus de l'articulation, de même que le tendon du *caput longum* du *biceps brachii* (longue portion du biceps brachial) **5**. Ils constituent la « **garde supérieure** » de l'articulation.

Sur une **vue postérieure** (Fig. 67), les **muscles coapteurs longitudinaux** sont au nombre de trois :

1) Le *deltoïdeus* (deltoïde) **8**, avec ses deux faisceaux latéral **8** et postérieur **8'** : il « remonte » la tête humérale lors de l'abduction ;
2) Le *triceps brachii* (triceps) par sa longue portion (*caput longum*) **7**, qui se fixe sur le tubercule sous-glénoïdien de l'omoplate : il ramène la tête humérale face à la glène lors de l'extension du coude.

Sur une **vue antérieure** (Fig. 68), les **muscles coapteurs longitudinaux** sont plus nombreux, certains précédemment cités :

1) Le *deltoïdeus* (deltoïde) **8**, avec ses deux faisceaux latéral **8** et antérieur, claviculaire (non figuré) ;
2) Le tendon du *caput longum* du *biceps brachii* (longue portion du biceps brachial) **5**, mais aussi sa courte portion (*caput breve*), qui s'insère sur l'apophyse coracoïde, à côté du *coracobrachialis* (coraco-brachial) **6**. Il ramène la tête humérale vers le haut lors de la flexion du coude et de l'épaule ;
3) Le *pectoralis major* par *sa pars clavicularis* **9** (faisceau claviculaire du grand pectoral), qui prolonge l'action du faisceau antérieur du deltoïde ; mais il est surtout fléchisseur et adducteur de l'épaule.

La prédominance des coapteurs longitudinaux peut, à long terme, « user » les muscles de la « coiffe », véritables coussins entre la tête et l'acromion, et même aboutir à la rupture de certains d'entre eux, en particulier le **sus-épineux** : la tête humérale vient alors buter directement sur la face inférieure de l'acromion et du ligament acromio-coracoïdien, créant les douleurs de ce qu'on appelait classiquement la péri-arthrite scapulo-humérale, et qu'on désigne maintenant sous le nom de « **syndrome de rupture de la coiffe des rotateurs** ».

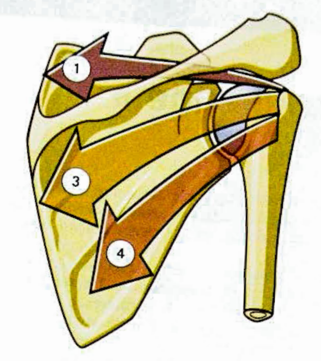


Fig. 64

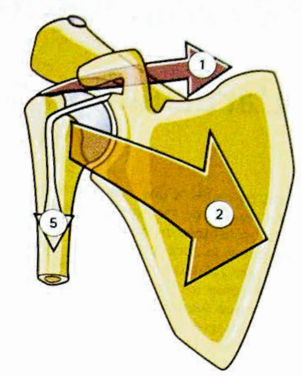


Fig. 65

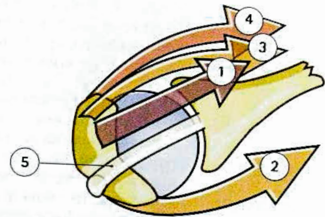


Fig. 66

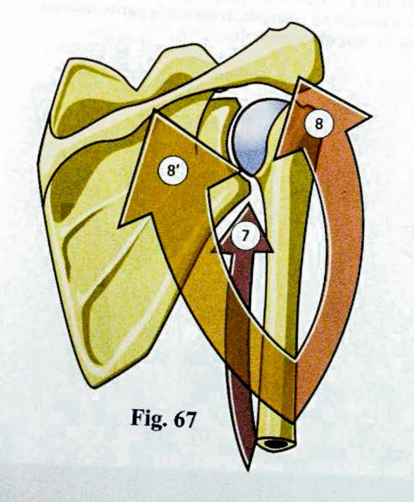


Fig. 67

Fig. 68

« L'articulation sous-deltoïdienne »

Il s'agit en réalité d'une « **fausse articulation** » ne comportant pas de surfaces articulaires cartilagineuses, mais constituée du simple plan de glissement celluleux entre la face profonde du *deltoïdeus* et la « coiffe des rotateurs », où certains ont pu voir une **bourse séreuse** facilitant le glissement.

L'**articulation sous-deltoïdienne « ouverte »** (Fig. 69 d'après Rouvière), après avoir sectionné transversalement et rabattu le *deltoïdeus* **1**, montre la face profonde du plan de glissement, la « coiffe des rotateurs » de l'épaule, constituée par l'extrémité supérieure de l'humérus **2**, sur laquelle viennent s'insérer :

- Le *supra-spinatus* (sus-épineux) **3** ;
- L'*infra-spinatus* (sous-épineux) **4** ;
- Le *teres minor* (petit rond) **5** et par devant, le *subscapularis* (sous-scapulaire) non visible sur cette vue ;
- Le tendon du *biceps brachii caput longum* (longue portion du biceps), visible au-dessus et au-dessous de la coulisse bicipitale **9** pénètre dans l'articulation.

La section du *deltoïdeus* a ouvert la bourse séreuse, dont on voit la coupe **7**.

Ce plan de glissement se prolonge en avant par le tendon du coraco-biceps (*coracobrachialis*) qui représente l'insertion commune sur l'apophyse coracoïde de la courte portion du biceps **13** et du coraco-brachial **14**, constituant la « garde antérieure » de l'articulation. On distingue aussi en arrière le tendon de la longue portion du triceps **6** (*triceps brachii caput longum*).

Le fonctionnement de ces muscles peut être apprécié sur **deux coupes frontales de l'articulation de l'épaule** : l'une en position de référence, bras vertical le long du corps (Fig. 70), l'autre en abduction, bras à l'horizontale (Fig. 71).

Sur la première (Fig. 70), on reconnaît les muscles précédemment cités, ainsi que la coupe de l'**articulation scapulo-humérale 8**, avec le **bourrelet glénoïdien** et le **récessus capsulaire inférieur**. La **bourse séreuse sous-deltoïdienne 7** s'interpose entre le *deltoïdeus* et l'extrémité supérieure de l'humérus.

Sur la seconde (Fig. 71), l'abduction due à la contraction du *supra-spinatus* (sus-épineux) **3** et du *deltoïdeus* **1** a fait littéralement « rouler » ou glisser la **bourse séreuse 7**, dont les deux feuillets glissent l'un par rapport à l'autre. La coupe de l'articulation scapulo-humérale **8** montre la mise en tension du récessus capsulaire inférieur dont la redondance, la surabondance, est nécessaire à une amplitude normale d'abduction de l'épaule. On constate aussi que le tendon de la longue portion du triceps **6** (*triceps brachii caput longum*), maintenant sous tension, constitue la **garde inférieure de la scapulo-humérale**.

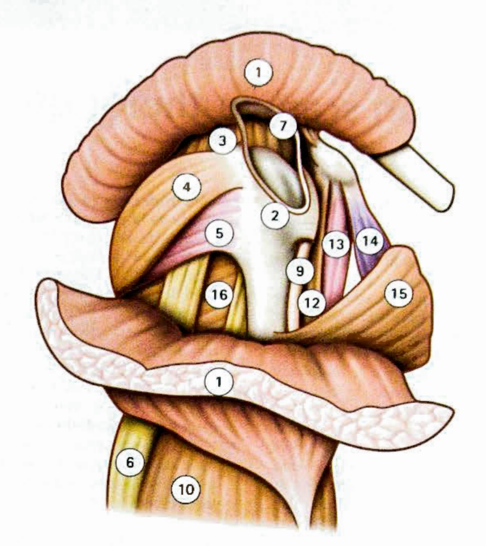


Fig. 69

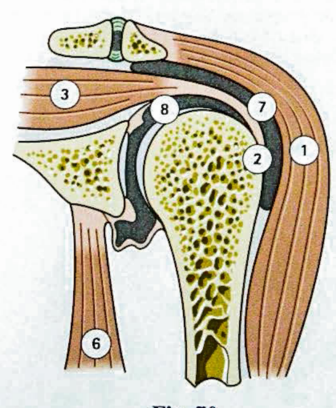


Fig. 70

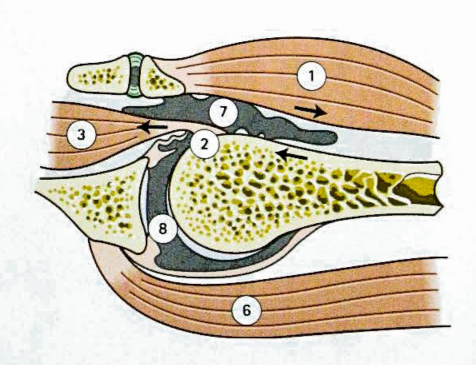


Fig. 71

« L'articulation scapulo-thoracique »

Il s'agit encore d'une « **fausse articulation** » ne comportant pas de surfaces articulaires cartilagineuses, mais constituée cette fois-ci de **deux plans de glissement celluleux** comme cela apparaît sur une **coupe horizontale du thorax** (Fig. 72).

Le **côté gauche de la coupe** montre le volume thoracique, avec la section oblique des côtes et des muscles intercostaux. Les autres éléments squelettiques sont l'humérus, sur lequel s'attache le *pectoralis major* (grand pectoral), flanqué en dehors par le *deltoïdeus* (deltoïde). Avec sa forme contournée, la coupe de l'omoplate (en jaune) apparaît doublée en avant du *subscapularis* (sous-scapulaire), et en arrière, de l'*infra-spinatus* (sous-épineux), du *teres minor* (petit rond) et du *teres major* (grand rond). C'est le *serratus major* (grand dentelé), lame musculaire s'étendant du bord interne de l'omoplate à la paroi latérale du thorax, qui crée **deux espaces celluleux de glissement** :

- L'**espace omo-serratique** **1**, compris entre l'omoplate, matelassée du subscapularis et le *serratus major* lui-même ;
- L'**espace thoraco** ou **pariéto-serratique** **2**, compris entre la paroi thoracique et le *serratus major.*

Le **côté droit de la coupe** révèle l'**architecture fonctionnelle de la ceinture scapulaire** :

- L'omoplate est comprise dans un plan formant un **angle de 30°** avec le plan d'appui dorsal, parallèle au plan frontal. Cet angle représente le **plan physiologique d'abduction de l'épaule** ;
- La clavicule, qui bien que contournée en S italique, est oblique en arrière et en dehors suivant une direction formant elle aussi un **angle de 30°** avec le plan frontal. Elle s'articule en avant et en dedans avec le sternum, par l'**articulation sterno-costo-claviculaire**, et en dehors et en arrière avec l'omoplate par l'**articulation acromio-claviculaire** ;
- L'angle formé entre la clavicule et l'omoplate est donc de **60°**, ouvert en dedans, ceci dans la position de référence, mais il peut varier suivant les mouvements de la ceinture scapulaire.

Sur une vue postérieure du squelette thoracique et de la ceinture scapulaire (Fig. 73), on a l'habitude de représenter l'omoplate comme si elle était comprise dans un plan frontal. En réalité, l'obliquité de son plan devrait la faire figurer en perspective. En position normale, l'omoplate s'étend en hauteur, de la 2ᵉ à la 7ᵉ côte. Son angle supéro-interne correspond à la 1ʳᵉ épineuse dorsale. L'extrémité interne de son épine est au niveau de la 3ᵉ épineuse. Son bord interne, ou spinal, est distant de 5 à 6 cm de la ligne des épineuses. Son angle inférieur est distant de 7 cm de la ligne des épineuses.

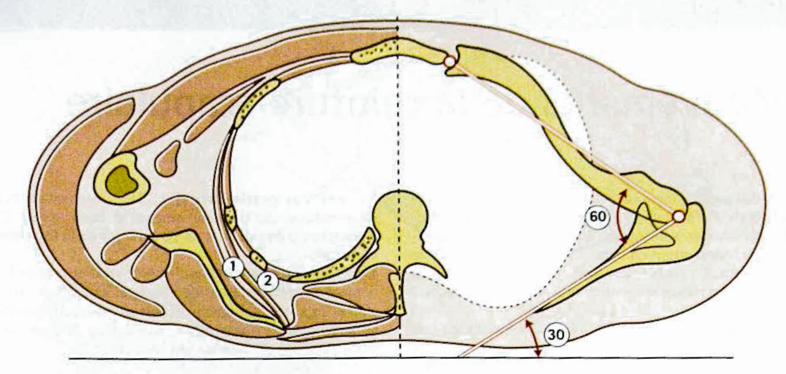


Fig. 72

Fig. 73

Mouvements de la ceinture scapulaire

On distingue analytiquement trois types de mouvements de l'omoplate, donc de la ceinture scapulaire : des mouvements de latéralité, des mouvements verticaux et des mouvements de rotation, dits « de sonnette ». En réalité, ces trois types de mouvements sont toujours associés entre eux à des degrés divers.

Sur **une coupe horizontale** (Fig. 74), on constate que les mouvements latéraux de l'omoplate sont asservis à la rotation de la clavicule autour de l'articulation sterno-costo-claviculaire, grâce à la mobilité de l'articulation acromio-claviculaire.

- Lorsque l'épaule est portée en arrière, dans un mouvement de **rétro-pulsion** (moitié droite de la coupe), la direction de la clavicule est, de ce fait, plus oblique en arrière, et l'angle omo-claviculaire augmente jusqu'à **70°**.
- Lorsque l'épaule est portée en avant, dans un mouvement d'**anté-pulsion** (moitié gauche de la coupe), la clavicule devient plus « frontale » (moins de 30°), le plan de l'omoplate se rapproche de la direction sagittale, l'angle omo-claviculaire a tendance à diminuer, à se fermer, au-dessous de **60°** et la glène tend à s'orienter vers l'avant. C'est alors que le diamètre transversal est le plus large.

Entre ces deux positions extrêmes, le plan de l'omoplate a varié de 30 à 45°.

Sur **une vue postérieure** (Fig. 75), on constate que l'antépulsion de l'épaule amène le bord spinal de l'omoplate à être distant de 10 à 12 cm de la ligne des épineuses.
Une vue postérieure (Fig. 76) permet d'apprécier les déplacements verticaux qui sont de l'ordre de 10 à 12 cm et s'accompagnent nécessairement d'une certaine bascule et d'une élévation ou d'un abaissement de l'extrémité externe de la clavicule.

La **vue postérieure** (Fig. 77) montre, de même les très importants mouvements de bascule, dits aussi « de sonnette » de l'omoplate. Cette rotation s'effectue autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'omoplate, passant par un centre situé à proximité de l'angle supéro-externe.

- Lors de la rotation « vers le bas » (côté droit), l'angle inférieur se déplace en dedans, mais surtout la glène tend à « regarder » vers le bas ;
- Lors de la rotation « vers le haut » (côté gauche), l'angle inférieur se déplace en dehors, et la glène tend à « regarder » vers le haut.

L'amplitude de cette rotation est de 45 à 60°. Le déplacement de l'angle inférieur est de 10 à 12 cm ; celui de l'angle supéro-externe de 5 à 6 cm, mais le plus important est le changement d'orientation de la glène qui joue un rôle essentiel dans les mouvements globaux de l'épaule.

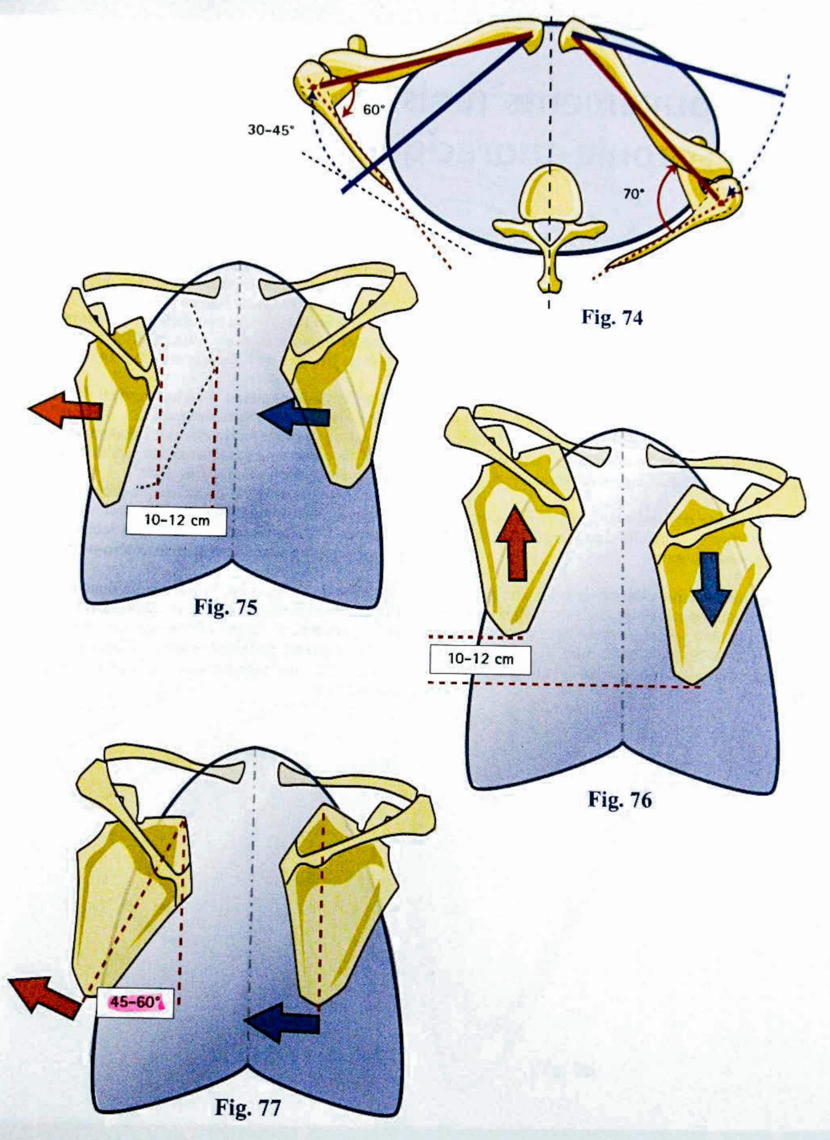


Fig. 74

Fig. 75

Fig. 76

Fig. 77

Les mouvements réels de la scapulo-thoracique

Nous avons décrits précédemment les **mouvements élémentaires de la scapulo-thoracique**, mais on sait maintenant que lors des mouvements d'abduction ou de flexion du membre supérieur, ces différents mouvements élémentaires se combinent à des degrés variables. Grâce à des séries de radiographies (Fig. 78) prises lors du mouvement d'abduction, J.-Y. de La Caffinière a pu, en les comparant à des photographies d'omoplate « sèche » prises dans des attitudes variables, étudier les composantes de son mouvement réel ; les vues en perspective de l'aeromion (en haut), de la coracoïde et de la glène (en haut et à droite) permettent d'établir que, lors de l'abduction active, l'omoplate est animée de quatre mouvements :

1) Une **ascension** de l'ordre de 8 à 10 cm sans que s'y associe, comme il est dit classiquement, de déplacement vers l'avant ;

2) Un **mouvement de sonnette** suivant une progression pratiquement linéaire, de 38° lorsque l'abduction du membre supérieur passe de 0 à 145°. À partir de 120° d'abduction, la rotation angulaire est égale dans la scapulo-humérale et la scapulo-thoracique ;

3) Un **mouvement de bascule** autour d'un axe transversal, oblique de dedans en dehors et d'arrière en avant, entraînant la pointe de l'omoplate en avant et en haut tandis que la partie supérieure de l'os se déplace en arrière et en bas, ce mouvement évoquant celui d'un homme qui se rejette en arrière pour regarder le sommet d'un gratte-ciel. Son amplitude est de 23° lors de l'abduction de 0 à 145°.

4) Un **pivotement** autour d'un axe vertical dont la caractéristique est d'être diphasique :
- Dans un premier temps, lors de l'abduction de 0 à 90°, la glène tend paradoxalement à s'orienter vers l'arrière suivant un angle de 10° ;
- Puis à partir de 90° d'abduction, la glène tend à reprendre une orientation vers l'avant suivant un angle de 6° ; elle ne reprend donc pas tout à fait son orientation initiale dans le plan antéro-postérieur.

Au cours de l'abduction, la glène subit donc un déplacement complexe, s'élevant, se rapprochant de la ligne médiane, tout en effectuant un changement d'orientation tel que le trochiter « échappe » en avant à l'acromion pour glisser sous le ligament acromio-coracoïdien.

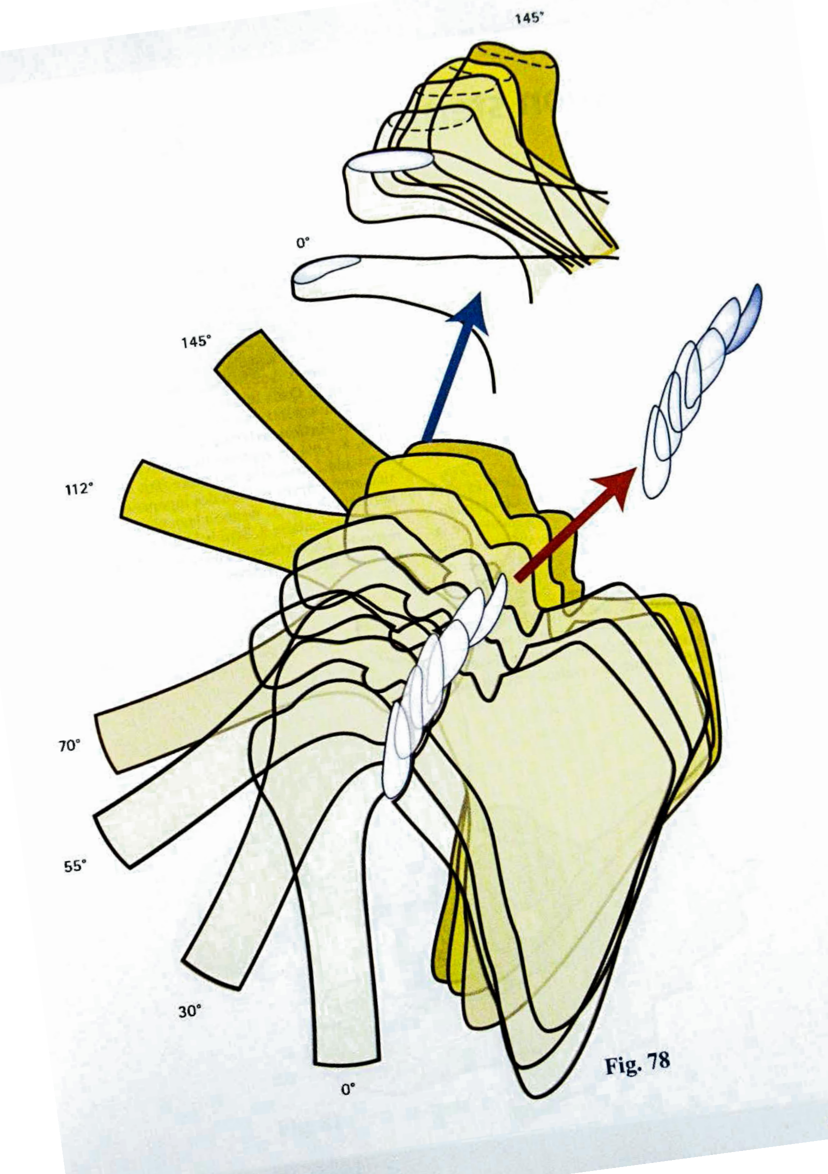


Fig. 78

L'articulation sterno-costo-claviculaire

Cette articulation fait partie, comme la trapézo-méta-carpienne, des **articulations de type toroïde**, c'est-à-dire que ses surfaces, en forme de selle, sont découpées sur la surface intérieure d'un **tore** : la meilleure image d'un tore est celle d'une « chambre à air ». Les deux surfaces représentées ici écartées (Fig. 79) présentent une **double courbure inversée** : convexes dans un sens, elles sont concaves dans l'autre, « découpée » sur la partie intérieure du tore. La courbure concave de l'une s'applique sur la courbure convexe de l'autre. La petite surface **1** est claviculaire, la grande **2** est sterno-costale. La petite surface est en réalité plus étendue horizontalement que verticalement, et « déborde » la surface sterno-costale en avant et surtout en arrière.

Les articulations de ce type possèdent **deux axes perpendiculaires** dans l'espace (Fig. 80), on dit **orthogonaux**. L'axe **1** correspond à la courbure concave de la surface sterno-costale et convexe de la surface claviculaire. L'axe **2** correspond à la courbure convexe de la surface sterno-costale et concave de la surface claviculaire. Les deux axes de chacune des surfaces se correspondent exactement, de même que les courbures. On appelle aussi « sellaires » ce type de surfaces, car la surface claviculaire s'applique facilement sur la surface sterno-costale, comme le cavalier s'assoit sur la selle de son cheval.

- L'axe **1** permet les mouvements claviculaires dans le plan vertical ;
- L'axe **2** autorise les mouvements claviculaires dans le plan horizontal.

Ce type d'articulation correspond à ce qu'on appelle un « cardan » en mécanique. Elle possède **deux degrés de liberté**, mais par la combinaison des deux mouvements élémentaires, elle peut aussi effectuer des mouvements sur l'axe longitudinal, ou **rotation conjointe**. Dans le cas de la clavicule, il existe aussi des mouvements passifs de rotation longitudinale.

L'**articulation sterno-costo-claviculaire droite** (Fig. 81) est ici représentée « ouverte » en avant. La clavicule **1**, basculée en arrière, fait voir sa surface articulaire **2**, après section des ligaments sterno-claviculaire supérieur **3**, sterno-claviculaire antérieur **4**, et costo-claviculaire **5**. Seul le ligament postérieur **6** a été respecté. La surface sterno-costale **7** est bien visible, avec ses deux courbures.

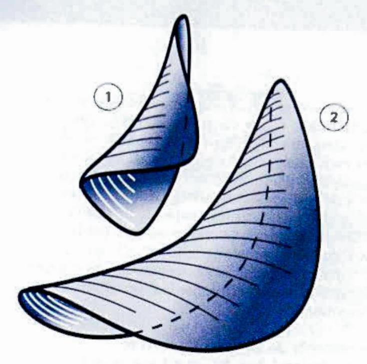


Fig. 79

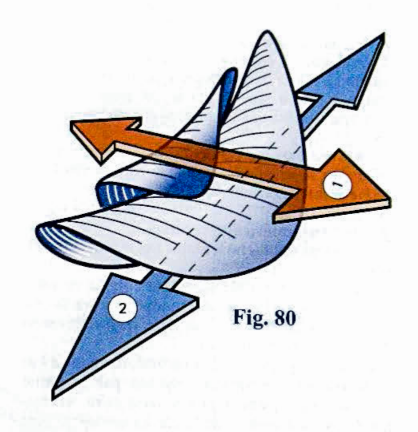


Fig. 80

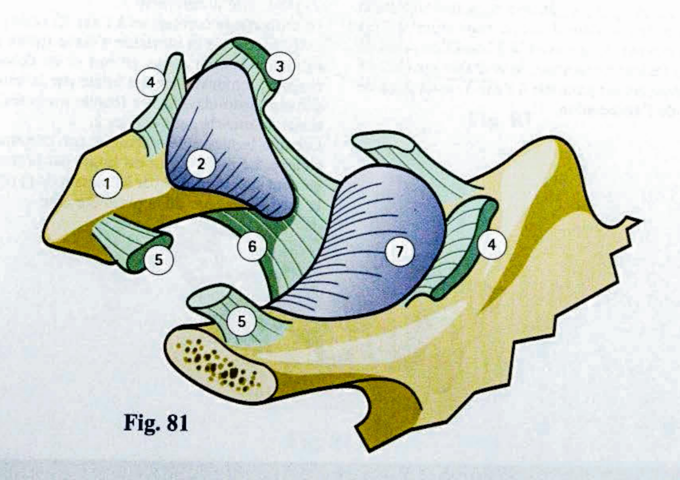


Fig. 81

Les mouvements

Sur cette vue de **l'articulation sterno-costo-claviculaire** (Fig. 82 : d'après Rouvière).

À droite : **coupe vertico-frontale** sur laquelle on distingue le ligament costo-claviculaire **1** inséré sur sa face supérieure de la 1[re] côte et se dirigeant en haut et en dehors vers la face inférieure de la clavicule ;

- Très souvent, **les deux surfaces articulaires** n'ont pas exactement les mêmes rayons de courbure, et la concordance est rétablie par un ménisque **3**, comme la selle entre le cavalier et le cheval. Ce **ménisque** subdivise l'articulation en deux cavités secondaires, qui peuvent ou non communiquer entre elles suivant que le ménisque est perforé ou non en son centre ;
- Le **ligament sterno-claviculaire 4**, ligament supérieur de l'articulation, est doublé en haut par le **ligament inter-claviculaire 5**.

À gauche : **vue antérieure** montrant :

- Le **ligament costo-claviculaire 1** et le **muscle sous-clavier 2** ;
- **L'axe X**, horizontal et légèrement oblique en avant et en dehors correspond aux mouvements de la clavicule dans le plan vertical. Amplitude : élévation 10 cm - abaissement 3 cm ;
- **L'axe Y**, situé dans un plan vertical, oblique en bas et légèrement en dehors, passant par la partie moyenne du ligament costo-claviculaire, correspond aux mouvements de la clavicule dans le plan horizontal. Amplitude : antéposition de l'extrémité externe de la clavicule 10 cm ; rétroposition de l'extrémité externe de la clavicule 3 cm. D'un point de vue strictement mécanique ; le véritable axe (Y') de ce mouvement est parallèle à l'axe Y, mais situé en dedans de l'articulation.

Il existe en outre un troisième mouvement, la **rotation longitudinale** de la clavicule, de 30° d'amplitude. Jusqu'alors on pensait qu'il n'était rendu possible que grâce au jeu mécanique de l'articulation, dû à la laxité ligamentaire. Mais, comme dans toutes les articulations à deux degrés de liberté, la sterno-costo-claviculaire produit une **rotation conjointe** lors de la rotation autour des deux axes. Ceci est confirmé par le fait que, dans la pratique, jamais cette rotation longitudinale de la clavicule n'apparaît isolément en dehors d'un mouvement d'élévation-rétroposition ou d'abaissement-antéposition.

Mouvements de la clavicule dans le plan horizontal (Fig. 83 : vue supérieure)

- En traits gras, la position moyenne de la clavicule ;
- Le point Y' correspond à l'axe mécanique du mouvement ;
- Les deux croix rouges représentent les positions extrêmes de l'insertion claviculaire du ligament costo-claviculaire.

Dans le cartouche, est figurée une coupe au niveau du ligament costo-claviculaire montrant la tension de celui-ci dans les positions extrêmes :

- L'antéposition est limitée par la tension du ligament costo-claviculaire et du ligament antérieur **1** ;
- La rétroposition est limitée par la tension du ligament costo-claviculaire et du ligament postérieur **2**.

Mouvements de la clavicule dans le plan frontal (Fig. 84 : vue antérieure)

La croix rouge correspond à l'axe X. Lorsque l'extrémité externe de la clavicule s'élève (traits gras), son extrémité interne glisse en bas et en dehors (flèche rouge). Le mouvement est limité par la tension du ligament costo-claviculaire (bande hachurée) et par le tonus du muscle sous-clavier **2**.

Lorsque la clavicule s'abaisse, son extrémité interne s'élève. Le mouvement est limité par la tension du ligament supérieur 4 et par le contact de la clavicule sur la face supérieure de la première côte.

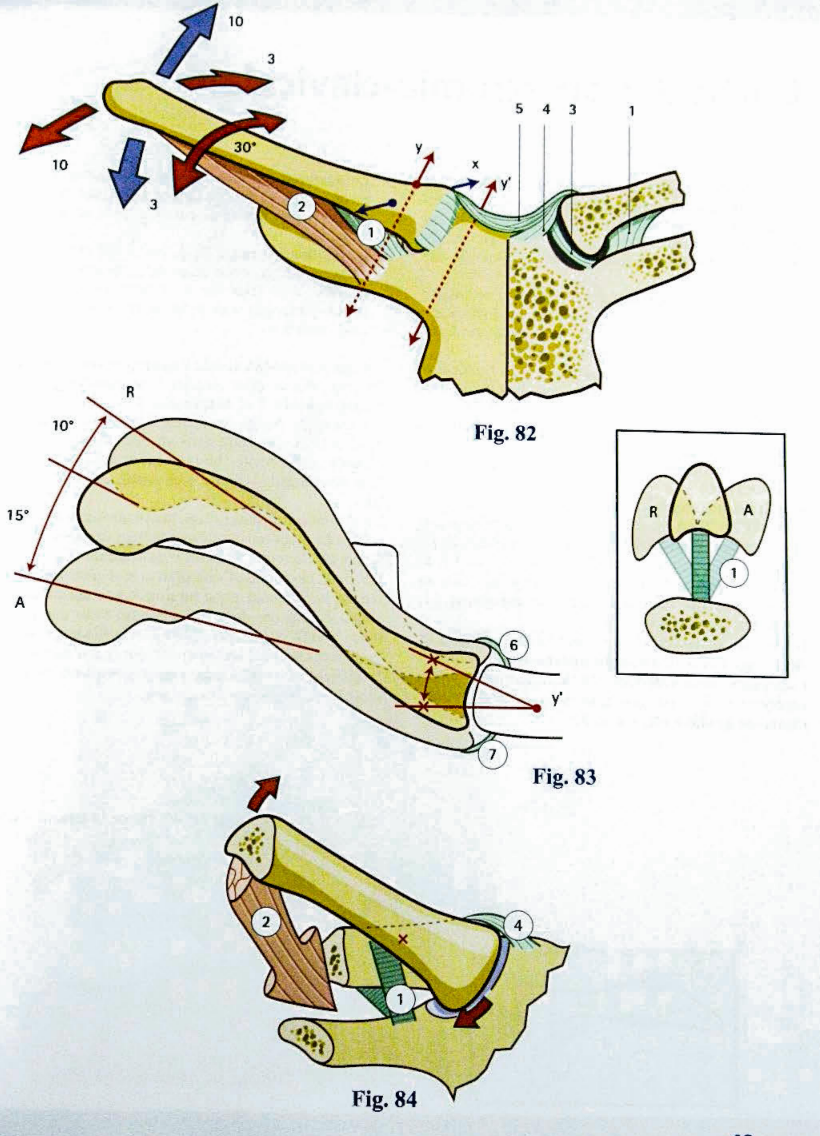


Fig. 82

Fig. 83

Fig. 84

L'articulation acromio-claviculaire

Une **vue postérieure « éclatée »** de l'**articulation acromio-claviculaire** (Fig. 85) met en évidence les facettes de cette arthrodie, articulation très instable, car sans aucun « emboîtement », mal protégée par un appareil ligamentaire très faible, donc très exposée aux luxations.

- **L'épine de l'omoplate 1**, prolongée par l'**acromion 2**, porte sur son bord antéro-interne une **facette articulaire 3** ovalaire, plane ou légèrement convexe, orientée en haut, en avant et en dedans;
- L'extrémité externe de la **clavicule 4** est taillée aux dépens de sa face inférieure par une **facette articulaire 5** identique à la précédente, orientée en bas, en arrière et en dehors, si bien que la clavicule est comme « posée » sur l'acromion;
- Cette articulation surplombe la **glène de l'omoplate 10** et;
- Elle est très exposée. En effet, sur une coupe frontale (Plan P) on voit (en cartouche) que le **ligament acromio-claviculaire supérieur 12** est peu solide;
- Les surfaces, souvent convexes, ne sont pas congruentes, si bien que dans un tiers des cas, un fibro-cartilage inter-articulaire, ou **ménisque 11**, rétablit la congruence.

En réalité, la stabilité de cette articulation dépend de **deux ligaments extra-articulaires** qui réunissent **l'apophyse coracoïde 6**, elle-même implantée au bord supérieur de la fosse sus-épineuse **9**, et la **face inférieure de la clavicule**. Ce sont:

- Le **ligament conoïde 7** qui part du coude de la coracoïde pour se fixer à la face inférieure de la clavicule, sur le tubercule conoïde, près de son bord postérieur;
- Le **ligament trapézoïde 8**, inséré sur la coracoïde en avant du précédent et se dirigeant en haut et en dehors, va se fixer sur un champ triangulaire rugueux prolongeant en avant et en dehors le tubercule conoïde.

Sur une **vue antérieure de l'apophyse coracoïde isolée** (Fig. 86), on peut détailler la disposition des **ligaments conoïde 7** et **trapézoïde 8** qui forment entre eux un angle dièdre ouvert en avant et en dedans, le ligament conoïde étant dans un plan frontal et le trapézoïde étant orienté obliquement de telle sorte que sa face antérieure « regarde » en avant, en dedans et en haut.

L'articulation acromio-claviculaire ainsi que la sterno-costo-claviculaire sont très sollicitées dans les mouvements de flexion-extension F de l'épaule (Fig. 87) du fait de la bascule de l'omoplate qui soumet l'arc-boutant de la clavicule à une **torsion** R qui, normalement s'épuise dans ces deux articulations. Pour une amplitude de 180° entre l'extension E et la flexion F, les articulations doivent absorber 60° par le jeu mécanique la différence de 30° étant due à la rotation conjoint dans la sterno-costo-claviculaire.

8
7
6

Fig. 86

F
R
Flexion
E

Fig. 87

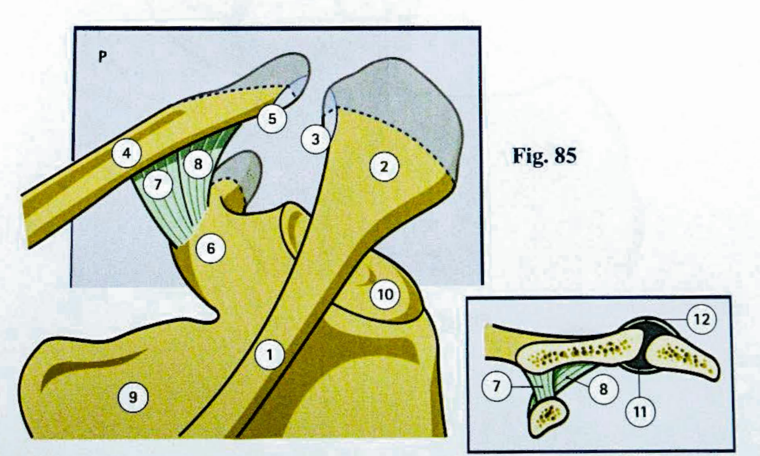


Fig. 85

Sur cette **vue supéro-externe de l'articulation acromio-claviculaire droite** (Fig. 88, d'après Rouvière) :

- Le plan superficiel du **ligament acromio-claviculaire 11** a été sectionné pour montrer son **plan profond** renforçant la capsule **15**.
- Outre les **ligaments conoïde 7** et **trapézoïde 8**, on peut remarquer le **ligament coraco-claviculaire interne 12**, encore appelé **ligament bicorne de Caldani**.
- Le **ligament acromio-coracoïdien 13**, sans rôle mécanique, contribue à former **la coulisse du sus-épineux** (Fig. 96). La glène de l'omoplate **11** rappelle la proximité des tendons de la coiffe des rotateurs avec ce ligament acromio-coracoïdien.
- Superficiellement, et non figurée sur ce schéma, vient se plaquer la **chape aponévrotique delto-trapézienne**, formée de fibres aponévrotiques faisant la liaison entre les fibres musculaires du deltoïde et celles du trapèze. Cette formation récemment décrite joue un rôle important dans la coaptation de l'articulation, limitant à elle seule l'amplitude de la luxation acromio-claviculaire.

La clavicule est vue « en fuite » par son extrémité interne (Fig. 89, vue inféro-interne, d'après Rouvière). On retrouve les éléments déjà décrits et le ligament coracoïdien **14** tendu d'un bord à l'autre de l'échancrure coracoïdienne, sans rôle mécanique.

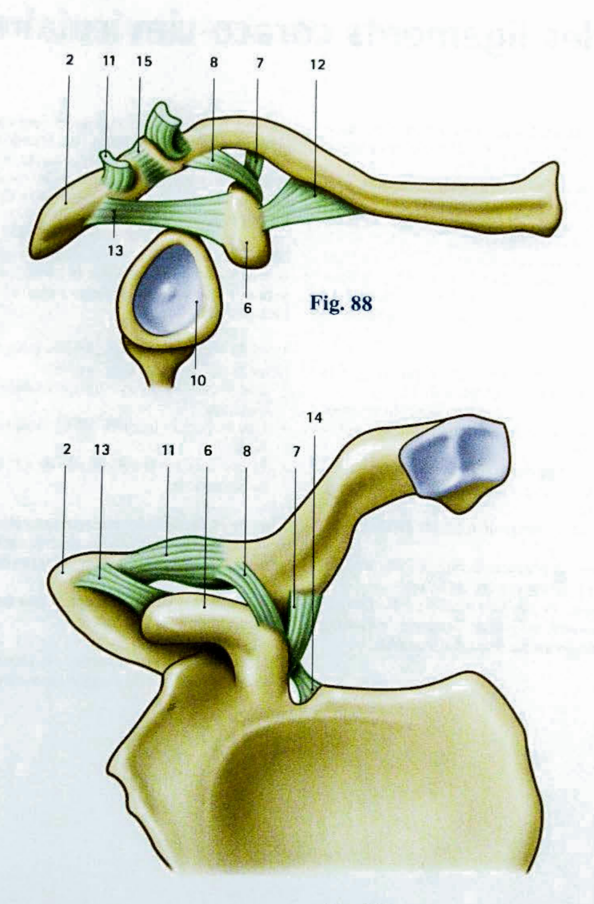


Fig. 88

Fig. 89

Rôle des ligaments coraco-claviculaires

Vue supérieure schématique de l'articulation acromio-claviculaire (Fig. 90) montrant le rôle du ligament conoïde **7**.

- L'omoplate vue d'en haut avec la coracoïde **6** et l'acromion **2** ;
- En tirets, les contours de la clavicule dans sa position de départ **4** et d'arrivée **4'**.

Ce schéma montre comment dans l'ouverture de l'angle entre clavicule et omoplate (flèche rouge), le ligament conoïde, figuré par deux bandes hachurées dans ses deux positions successives, se tend et limite le mouvement.

Une autre vue supérieure schématique (Fig. 91) montre le **rôle du ligament trapézoïde** **8**.

Dans la fermeture de l'angle entre clavicule et omoplate (flèche bleue), le ligament trapézoïde se tend et limite le mouvement.

Le **mouvement de rotation axiale** dans l'articulation acromio-claviculaire (Fig. 92) se voit bien sur cette vue antéro-interne :

- La croix marque le centre de rotation de l'articulation ;
- En teinte claire, la position initiale de l'omoplate, dont la moitié inférieure a été réséquée ;
- En teinte foncée, la position finale de l'omoplate lorsqu'elle a tourné au bout de la clavicule **comme le battoir d'un fléau au bout du manche**.

On voit la tension des ligaments conoïde (bande hachurée) et trapézoïde (pointillé). L'amplitude de cette rotation (30°) s'ajoute à la rotation de 30° dans l'articulation sterno-costo-claviculaire pour permettre l'amplitude de 60° des mouvements de sonnette de l'omoplate.

Une étude de Fischer et coll. a montré, grâce à des séries de photographies, toute **la complexité des mouvements dans l'acromio-claviculaire**, arthrodie faiblement emboîtée.

Lors de l'**abduction**, en prenant pour base de référence fixe l'omoplate, on constate :

- Une élévation de 10° de l'extrémité interne de la clavicule ;
- Une ouverture jusqu'à 70° de l'angle omo-claviculaire ;
- Et une rotation longitudinale de 45° de la clavicule vers l'arrière.

Lors de la **flexion**, les mouvements élémentaires sont semblables, bien qu'un peu moins marqués en ce qui concerne l'ouverture de l'angle omo-claviculaire.

Lors de l'**extension**, on assiste à une fermeture de 10° de l'angle omo-claviculaire.

Lors de la **rotation interne**, on assiste seulement à l'ouverture de 13° de l'angle omo-claviculaire.

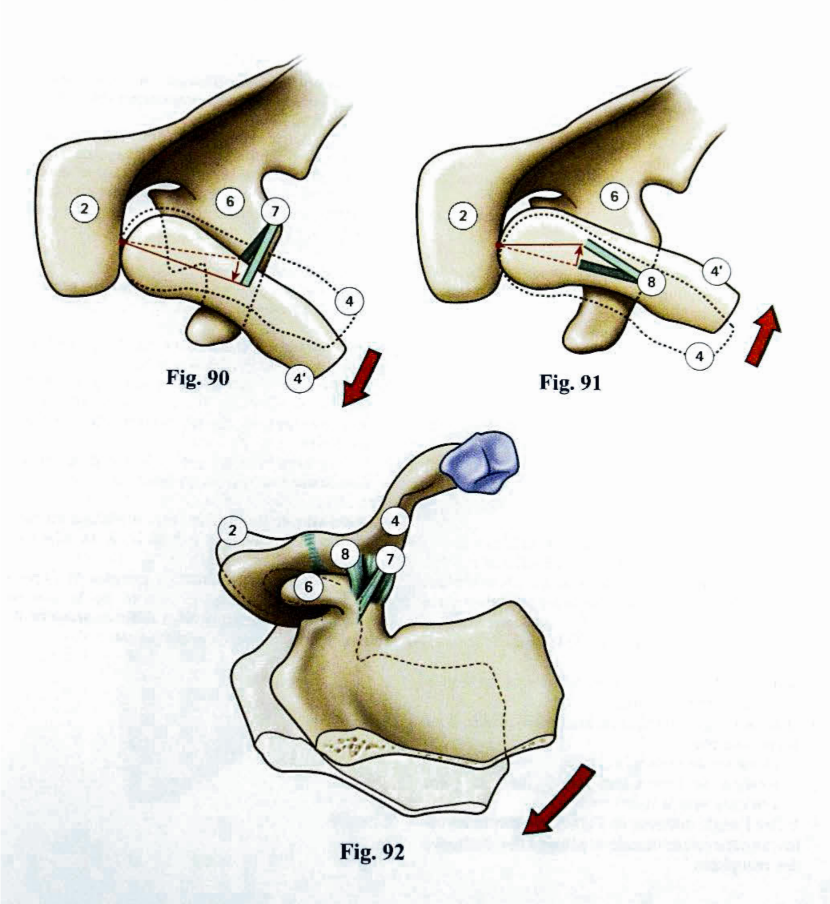


Fig. 92

Muscles moteurs de la ceinture scapulaire

Sur ce schéma du thorax (Fig. 93), la moitié droite représente une vue postérieure.

1) **Trapèze**: réparti en trois portions dont l'action est différente:

- **Faisceau supérieur 1**; faisceau acromio-claviculaire. Par son action:
  - il soulève le moignon de l'épaule et empêche sa chute sous le poids d'une charge;
  - il crée une hyperlordose cervicale avec rotation de la tête du côté opposé, lorsque ce faisceau prend son point fixe sur l'épaule.

- **Faisceau moyen 1'**, faisceau épineux, de direction transversale. Sa contraction:
  - rapproche de 2 à 3 cm le bord interne de l'omoplate de la ligne des épineuses et applique l'omoplate contre le thorax;
  - il porte le moignon de l'épaule en arrière.

- **Faisceau inférieur 1"**. Sa direction est oblique en bas et en dedans. Par son action:
  - il attire l'omoplate en bas et en dedans.

La contraction simultanée des trois faisceaux:
  - porte l'omoplate en dedans et en arrière;
  - la fait tourner vers le haut de 20°. Son rôle est modeste dans l'abduction, mais important dans le port de lourdes charges; il empêche la chute du bras et le décollement de l'omoplate.

2) **Rhomboïde 2**. Sa direction est oblique en haut et en dedans. Par son action:

- Il attire l'angle inférieur en haut et en dedans, donc il entraîne une:
  - élévation de l'omoplate, avec;
  - rotation de l'omoplate vers le bas: la glène s'oriente vers le bas.
- Il fixe l'angle inférieur de l'omoplate contre les côtes; sa paralysie se manifeste par un « décollement » des omoplates.

3) **Angulaire 3**. Sa direction est oblique en haut et en dedans et son action est assez semblable à celle du rhomboïde. En effet:

- Il attire l'angle supéro-interne en haut et en dedans de 2 à 3 cm: action de hausser les épaules);
- Il se contracte lors du port d'une charge, et sa paralysie entraîne une chute du moignon de l'épaule;
- Il entraîne une légère rotation de la glène vers le bas.

4) **Grand dentelé 4'** (Fig. 94).
Sur le schéma (Fig. 93), la moitié gauche représente une vue antérieure avec:

5) **Petit pectoral 6**: sa direction est oblique en bas, en avant et en dedans. Par son action:

- Il abaisse le moignon de l'épaule, ce qui porte la glène à regarder vers le bas. Cette action est utilisée, par exemple, lors de mouvements aux barres parallèles;
- Il fait glisser l'omoplate en dehors et en avant, avec décollement de son bord postérieur.

6) **Sous-clavier 5**: sa direction est oblique en bas et en dedans, presque parallèle à la clavicule. Lorsqu'il se contracte:

- Il abaisse la clavicule, donc le moignon de l'épaule;
- Et applique l'extrémité interne de la clavicule contre le manubrium sternal, donc coapteur de l'articulation sterno-costo-claviculaire.

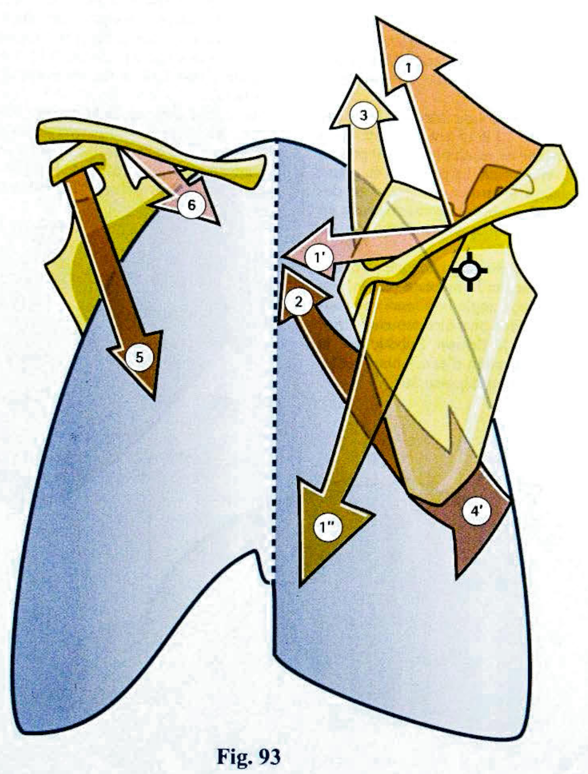


Fig. 93

Sur un **schéma de profil du thorax** (Fig. 94), on distingue :

- Le *trapezius* (trapèze) **1** élévateur de la ceinture scapulaire ;
- De même que le *levator scapulæ* (angulaire de l'omoplate) **3** ;
- Le *serratus major* (grand dentelé) **4** et **4'** situé à la face profonde de l'omoplate et s'étalant sur la paroi postéro-latérale du thorax, avec ses deux portions :
  - l'une **supérieure** à direction horizontale **4**, qui attire l'omoplate de 12 à 15 cm en avant et en dehors et l'empêche de reculer lorsqu'on pousse un objet lourd vers l'avant. La paralysie du grand dentelé est facile à mettre en évidence : en demandant au sujet de s'appuyer contre un mur, en déséquilibre avant, l'omoplate « décolle » du coté paralysé ;
  - l'autre **inférieure** **4'** à direction oblique en bas et en avant, faisant basculer l'omoplate vers le haut en tirant en dehors son angle inférieur : cette action, qui oriente la glène plus directement vers le haut, intervient dans la flexion, l'abduction, le port de charge – seau plein d'eau – mais seulement lorsque l'abduction dépasse 30°.

Sur une **coupe horizontale du thorax** (Fig. 95), la projection de la ceinture scapulaire permet d'apprécier l'action des muscles :

- Sur le **côté droit de la coupe** : le *serratus major* (grand dentelé) **4** et le *pectoralis minor* (petit pectoral) **5** attirent l'omoplate en dehors et éloignent son bord spinal de la ligne des épineuses. Le *pectoralis minor* (petit pectoral) et le *subclavius* (sous-clavier), non figurés ici, abaissent la ceinture scapulaire ;
- Sur le **côté gauche de la coupe** : le *trapezius* (trapèze) par son faisceau moyen (non figuré ici), ainsi que le *rhomboïdeus* (rhomboïde) **1**, rapprochent le bord spinal de l'omoplate de la ligne des épineuses. Le *rhomboïdeus* est aussi élévateur de l'omoplate.

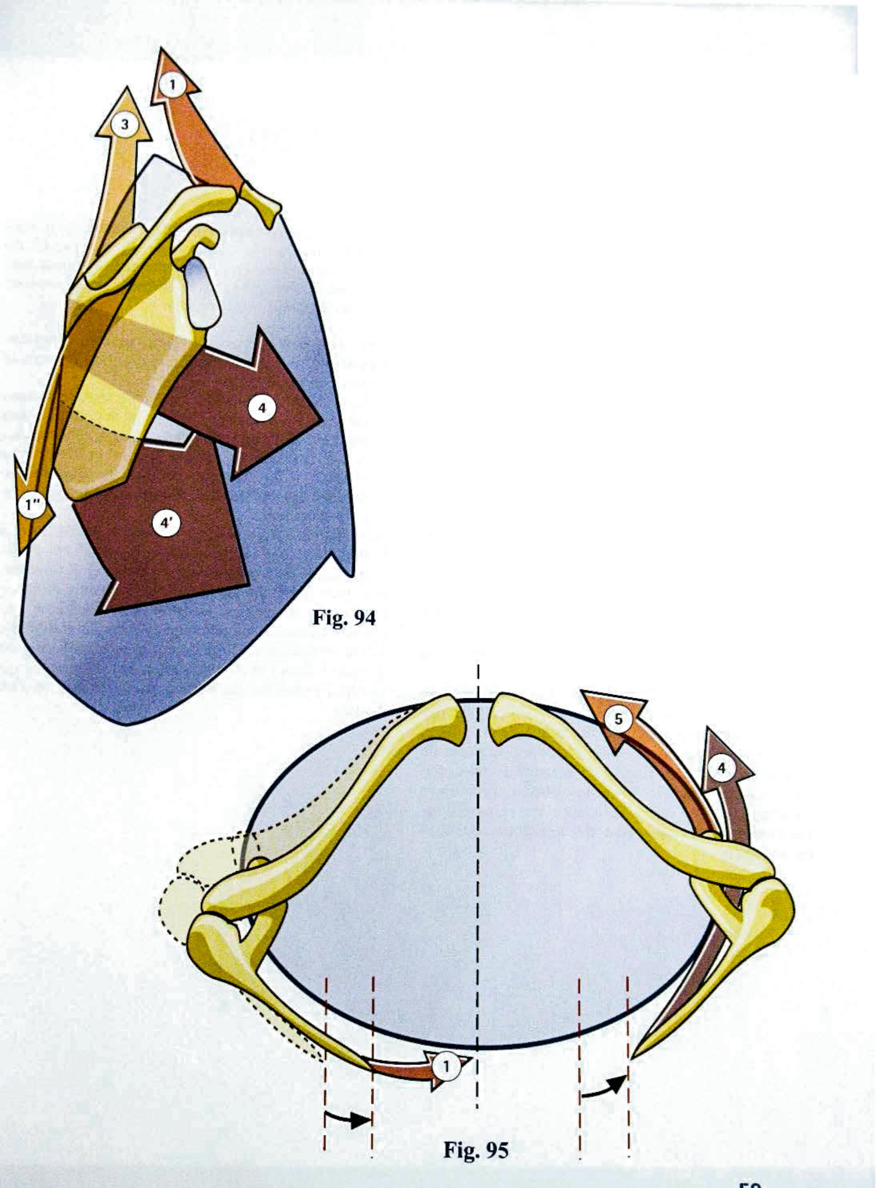


Fig. 94

Fig. 95

Le sus-épineux et l'abduction

Une **vue externe de l'omoplate** (Fig. 96) montre parfaitement la **coulisse du *supraspinatus*** (sus-épineux) (*), limitée :

- En arrière, par l'épine de l'omoplate et l'acromion **a** ;
- En avant, par l'apophyse coracoïde **c** ;
- En haut, par le ligament acromio-coracoïdien **b** en continuité avec l'acromion, ce qui constitue une voûte ostéo-ligamentaire, dite la **voûte acromio-coracoïdienne**.

Cette coulisse forme un **anneau rigide et inextensible**, si bien que :

- Si le tendon du sus-épineux est épaissi par un processus inflammatoire ou dégénératif, il a du mal à y glisser ;
- S'il présente un nodule, il lui arrive de s'y coincer, créant le **phénomène de l'épaule à ressaut**, lorsqu'il finit par passer après avoir vaincu la résistance ;
- S'il est rompu par le processus dégénératif, cela réalise une « **perforation de la coiffe** », entraînant deux conséquences :
  - la **perte de l'abduction active complète**, qui ne dépasse plus l'horizontale ;
  - le **contact direct de la tête humérale sous la voûte acromio-coracoïdienne**, à l'origine des douleurs du « syndrome de rupture de la coiffe ».

On comprend aussi que la réparation chirurgicale du tendon soit rendue difficile par l'exiguïté de cette coulisse, ce qui justifie **l'acromioplastie inférieure** (résection de la moitié inférieure en épaisseur de l'acromion) et la **résection du ligament acromio-coracoïdien.**

Une vue antéro-supérieure de l'articulation scapulo-humérale (Fig. 97) **permet de** comprendre de quelle façon le sus-épineux **2**, étendu de la fosse sus-épineuse de l'omoplate jusqu'au trochiter, glisse sous la voûte acromio-coracoïdienne **b**.

Une vue postérieure de l'articulation scapulo-humérale (Fig. 98) montre la disposition des quatre muscles de l'abduction :

1) Le *deltoïdeus* (deltoïde) **1** formant avec le *supraspinatus* (sus-épineux) **2** le **couple fonctionnel des moteurs de l'abduction** dans la scapulo-humérale ;
1) Le *serratus major* (grand dentelé) **3** et le *trapezius* (trapèze) **4** qui forment ensemble le **couple fonctionnel des moteurs de l'abduction** dans la scapulo-thoracique.

Non figurés sur ce schéma, mais non moins utiles à l'abduction sont les muscles *infrascapularis* (sous-scapulaire), *infraspinatus* (sous-épineux) et *teres minor* (petit rond) qui attirent la tête humérale en bas et en dedans, créant avec le deltoïde un deuxième couple fonctionnel d'abduction dans la scapulo-humérale.

Enfin, le tendon du long biceps joue un rôle non négligeable dans l'abduction car on sait maintenant que sa rupture entraîne une perte de 20 % de la force d'abduction.

Fig. 96

Fig. 98

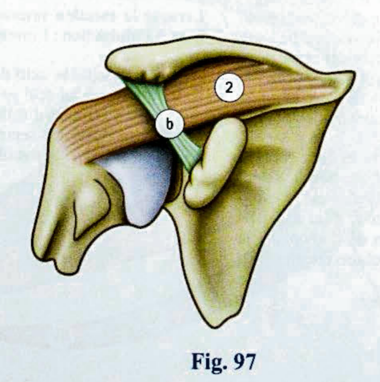


Fig. 97

Physiologie de l'abduction

À première vue, la physiologie de l'abduction paraît simple : elle résulte de l'action de deux muscles, le *deltoïdeus* (deltoïde) et le *supraspinatus* (sus-épineux). Cependant, on discute encore sur le rôle respectif de chacun de ces muscles et sur leurs actions réciproques. Des études électromyographiques (J-J. Comtet et Y. Auffray, 1970) viennent éclairer ce sujet d'une lumière nouvelle.

Rôle du deltoïde

Pour Fick (1911), on peut distinguer fonctionnellement sept portions dans le deltoïde (Fig. 101, coupe schématique horizontale, partie inférieure) :

- Le faisceau antérieur, claviculaire, en comporte deux : I et II ;
- Le faisceau moyen, acromial, un seul III ;
- Le faisceau postérieur, spinal, quatre IV, V, VI et VII.

Lorsqu'on considère ces portions suivant leur situation par rapport à l'axe d'abduction pure AA' (Fig. 100 : vue antérieure et Fig. 99 : vue postérieure) on constate que certaines, la totalité du faisceau acromial (III), la partie la plus externe de la portion II dans le faisceau claviculaire et la portion IV du faisceau spinal, sont d'emblée abductrices, car situées en dehors de l'axe (Fig. 101). Les autres (I, V, VI, VII), par contre, sont adductrices lorsque le membre supérieur pend le long du corps. Ces portions du deltoïde sont donc antagonistes des premières. Ce n'est qu'à mesure que le mouvement d'abduction les fait passer en dehors de l'axe sagittal qu'elles deviennent abductrices. Il existe donc pour elles une inversion de leur action suivant la position de départ du mouvement. Encore certaines restent-elles adductrices (VI et VII) quel que soit le degré d'abduction.

Strasser (1917) est en gros d'accord avec cette conception, mais fait cependant remarquer que pour l'abduction s'effectuant dans le plan de l'omoplate, c'est-à-dire avec une flexion de 30°, autour d'un axe BB' (Fig. 101) perpendiculaire au plan de l'omoplate, la presque totalité du faisceau claviculaire est d'emblée abductrice.

Les études électromyographiques ont montré que les différentes portions entrent successivement en action à mesure que l'abduction progresse, avec un décalage dans le temps d'autant plus grand qu'elles sont plus adductrices au départ, comme si elles étaient commandées par un clavier central.

Les portions abductrices ne sont donc pas contrecarrées par les portions antagonistes. Il s'agit là d'un exemple du phénomène d'innervation réciproque de Sherrington.

Lors de **l'abduction pure**, l'ordre d'entrée « en scène » est le suivant :

1) Faisceau acromial III ;
2) Portions IV et V presque immédiatement ensuite ;
3) Enfin portion II à partir de 20-30°.

Lors de **l'abduction associée à la flexion** de 30° :

1) Portions III et II entrent en action d'emblée ;
2) Les portions IV et V de plus en plus tardivement, ainsi que la portion I.

Lorsque la **rotation externe de l'humérus est combinée à l'abduction :**

1) La portion II se contracte dès le début ;
2) Alors que les portions IV et V n'interviennent même pas à la fin de l'abduction.

Lorsque la **rotation interne de l'humérus se combine à l'abduction :** l'inverse s'observe.

Au total, le deltoïde, actif dès le début de l'abduction, peut la mener à lui seul jusqu'à son amplitude complète. Son maximum d'activité se situe autour de 90° d'abduction. Sa force serait alors, pour Inman, égale à 8,2 fois le poids du membre supérieur.

Fig. 99

Fig. 100

Fig. 101

Rôle des muscles rotateurs

Après avoir fait jouer un rôle important, sinon fondamental, à la synergie deltoïde-sus-épineux, il semble maintenant que les autres muscles de la coiffe soient aussi indispensables à l'efficacité du deltoïde (Inman). En effet, lors de l'abduction (Fig. 102), la décomposition de la force du deltoïde **D**, fait apparaître une composante longitudinale Dr, qui, diminuée de la composante longitudinale **Pr** du poids **P** du membre supérieur (agissant au centre de gravité), va être appliquée en tant que force **R** au centre de la tête humérale. Or, cette force R peut à son tour être décomposée en une force **Rc** qui applique la tête sur la glène, et une autre Rl, plus puissante, qui tend à la luxer en haut et en dehors. Si les muscles rotateurs (*infra-spinatus, infra-scapularis, teres minor*) se contractent alors, leur force globale Rm s'oppose directement à la composante luxante Rl et la tête humérale ne peut se luxer en haut et en dehors (Fig. 104). La force d'abaissement Rm des muscles rotateurs crée donc avec la force d'élévation Dt du deltoïde, un couple de rotation générateur de l'abduction. La force des muscles rotateurs passe par un maximum pour 60° d'abduction. L'électromyographie (Inman) confirme ce maximum d'activité pour le sous-épineux.

Rôle du *supra-spinatus* (sus-épineux)

Le muscle *supra-spinatus* (sus-épineux) était jusqu'alors réputé être l'initiateur de l'abduction (« *abductor starter* » des auteurs anglo-saxons). La mise hors du jeu du sus-épineux par blocage anesthésique du nerf sus-scapulaire (B. Van Linge et J.-D. Mulder) a permis de démontrer qu'il n'est pas indispensable à l'abduction même en son début : le deltoïde seul est suffisant pour obtenir une abduction complète.

Cependant, inversement, le *supra-spinatus* est capable à lui seul de déterminer une abduction d'amplitude égale à celle du *deltoïdeus* (expérience d'excitation électrique de Duchene de Boulogne et observations cliniques de paralysie isolée du deltoïde).

L'électromyographie montre qu'il se contracte pendant toute la durée de l'abduction et que son maximum d'activité se situe à 90° d'abduction, comme pour le deltoïde.

Au début de l'abduction (Fig. 103), sa composante tangentielle Et est proportionnellement plus forte que celle du deltoïde Dt, mais son bras de levier est plus court. Sa composante radiale Er applique fortement la tête humérale sur la glène et contribue puissamment à empêcher sa luxation vers le haut sous l'action de la composante radiale Dr du deltoïde. Il joue ainsi un rôle coapteur identique à celui des muscles rotateurs. De même, en mettant en tension la partie supérieure de la capsule, il s'oppose à la subluxation inférieure de la tête humérale (Dautry et Gosset).

Le *supra-spinatus* est donc synergique des autres muscles de la coiffe, les muscles rotateurs. Il aide puissamment le *deltoïdeus* qui, lorsqu'il agit isolément, se fatigue rapidement.

Au total, son action est à la fois **qualitative** sur la coaptation articulaire, et **quantitative** sur l'endurance et la puissance de l'abduction. Sa physiologie simple s'oppose à celle complexe du deltoïde. Sans lui faire bénéficier du titre d'abducteur-starter qu'il a eu pendant longtemps, on peut cependant dire qu'il est utile et efficace surtout au début de l'abduction.

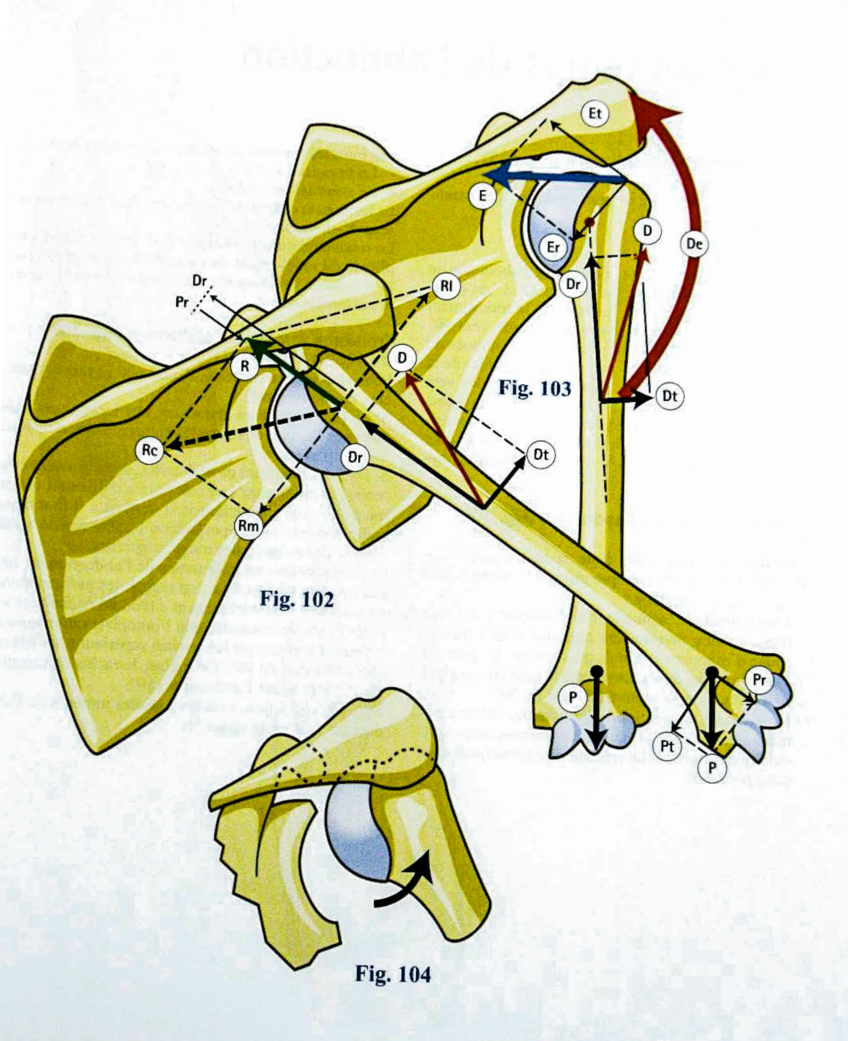


Fig. 104

Les trois temps de l'abduction

Premier temps de l'abduction (Fig. 105) : de 0° à 60°

Les muscles moteurs de ce premier temps sont essentiellement :

- Le *deltoïdeus* **1** ;
- Le *supra-spinatus* **2**.

Ces deux muscles forment le couple de l'abduction au niveau de l'articulation scapulo-humérale. C'est en effet dans cette articulation que débute le mouvement d'abduction. Ce premier temps se termine vers 90° lorsque l'articulation scapulo-humérale est bloquée du fait de la butée du trochiter sur le bord supérieur de la glène. La rotation externe effaçant le trochiter vers l'arrière retarde ce blocage mécanique, de même qu'une légère flexion. Avec Steindler, on peut considérer que l'abduction en flexion de 30°, dans le plan du corps de l'omoplate, est la véritable abduction physiologique.

Deuxième temps de l'abduction (Fig. 106) : de 60° à 120°

L'articulation scapulo-humérale étant bloquée, l'abduction ne peut continuer que grâce à la participation de la ceinture scapulaire :

- Mouvement de sonnette de l'omoplate, rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (pour l'omoplate droite) qui amène la glène à s'orienter plus directement vers le haut ; on sait que l'amplitude de ce mouvement est de 60°.
- Mouvement de rotation longitudinale, mécaniquement lié, dans les articulations sterno-costo-claviculaire et acromio-claviculaire, qui participent chacune pour 30°.

Les muscles moteurs de ce deuxième temps sont :

- Le *trapezius* **3** et **4** ;
- Le *serratus major* **5**.

Ils forment le couple de l'abduction dans l'articulation scapulo-thoracique.

Le mouvement est limité vers 150° (90° + 60° d'amplitude du mouvement de sonnette de l'omoplate) par la résistance des muscles adducteurs : *dorsalis major* et *pectoralis major*.

Troisième temps de l'abduction (Fig. 107) : de 120° à 180°

Pour atteindre la verticale, il faut que le rachis participe au mouvement.

Si un seul bras est en abduction, une inclinaison latérale sous l'action des muscles spinaux du côté opposé **6** est suffisante.

Si les deux bras sont en abduction, ils ne peuvent être rendus parallèles qu'en étant portés en flexion maximum. Pour qu'ils atteignent la verticale, il faut alors compléter par une hyperlordose lombaire, elle aussi sous la dépendance des muscles spinaux.

Cette distinction en trois temps de l'abduction est naturellement schématique : en réalité, les participations musculaires sont intriquées et « fondues enchaînées » ; il est facile de constater que l'omoplate commence à « tourner » avant que le membre supérieur n'ait atteint une abduction de 90°. De même, le rachis commence à s'incliner avant l'abduction 150°.

En fin d'abduction, tous les muscles moteurs de l'abduction sont en contraction.

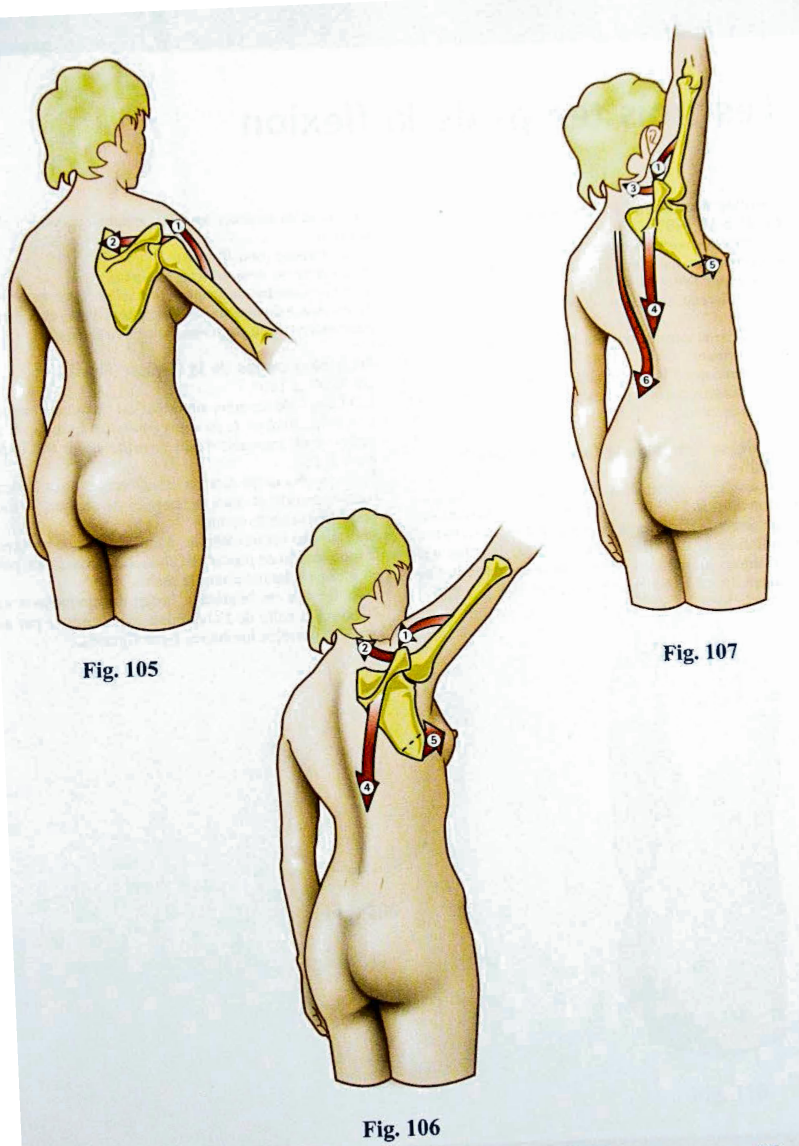


Fig. 105

Fig. 106

Fig. 107

Les trois temps de la flexion

Premier temps de la flexion (Fig. 108): de 0° à 50°-60°

Les muscles moteurs de ce premier temps sont:

- Le faisceau antérieur, claviculaire, du *deltoïdeus* **1**;
- Le *coraco-brachialis* **2**;
- Le faisceau supérieur, claviculaire, du *pectoralis major* **3**.

Cette flexion dans la scapulo-humérale est limitée par deux facteurs:

1) La tension du ligament coraco-huméral;
2) La résistance des muscles petit rond, grand rond et sous-épineux.

Deuxième temps de la flexion (Fig. 109): de 60° à 120°

Mise en jeu de la ceinture scapulaire:

- Rotation de 60° de l'omoplate par un mouvement de sonnette qui oriente la glène en haut et en avant;
- Rotation axiale, mécaniquement liée, dans les articulations sterno-costo-claviculaire et acromio-claviculaire, chacune participant pour 30°.

Les muscles moteurs sont les mêmes que pour l'abduction:

- Le trapèze (non figuré);
- Le *serratus anterior* (ou major) **6**.

Cette flexion dans la scapulo-thoracique est limitée par la résistance du *latissimus dorsi* (non figuré) et du faisceau inférieur du *pectoralis major* (non figuré).

Troisième temps de la flexion (Fig. 110): de 120° à 180°

L'élévation du membre supérieur est continuée par action du *deltoïdeus* **1**, du *supra-spinatus* **4**, du faisceau inférieur du *trapezius* **5**, du *serratus major* (ou *anterior*) **6**.

Le mouvement de flexion étant bloqué dans la scapulo-humérale et dans la scapulo-thoracique, il faut faire intervenir le rachis.

Si la flexion est unilatérale, il est possible de terminer le mouvement en passant en abduction maximum, puis en inclinant latéralement le rachis.

Si la flexion est bilatérale, la fin du mouvement est identique à celle de l'abduction hyperlordose par action des muscles lombaires (non figurés).

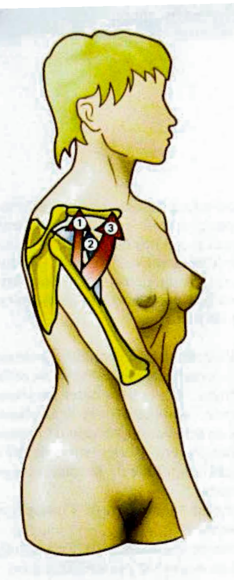


Fig. 108

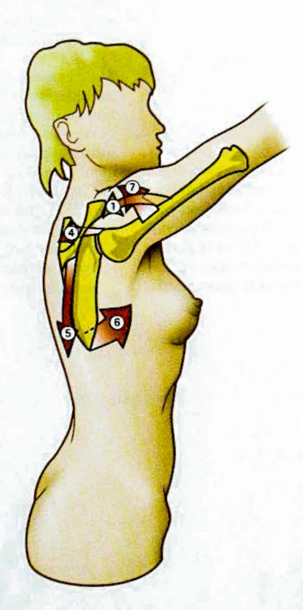


Fig. 109

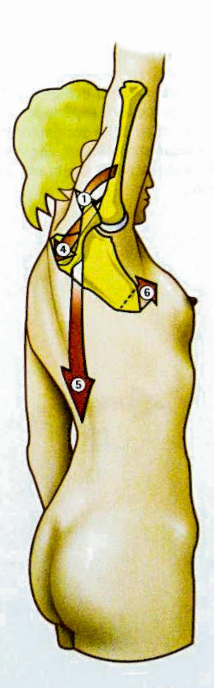


Fig. 110

Muscles rotateurs

Une vue supérieure schématique de l'articulation scapulo-humérale (Fig. 111), montre les muscles rotateurs :

- **Rotateurs internes** (voir aussi Fig. 112)
  1) *Latissimus dorsi* **1** (grand dorsal) ;
  2) *Teres* major **2** (grand rond) ;
  3) *Infra-scapularis* **3** (sous-scapulaire) ;
  4) *Pectoralis* major **4** (grand pectoral).

- **Rotateurs externes** (voir aussi Fig. 113)
  5) *Infra-spinatus* **5** (sous-épineux) ;
  6) *Teres minor* **7** (petit rond).

Face au nombre et à la puissance des muscles rotateurs internes, les muscles rotateurs externes sont faibles : ils sont pourtant indispensables pour la bonne utilisation du membre supérieur, car seuls ils peuvent décoller la main de la face antérieure du tronc et la porter en avant et en dehors ; ce mouvement de dedans en dehors de la main droite est indispensable pour l'écriture.

À noter que si ces deux muscles possèdent un nerf distinct (nerf sus-scapulaire pour le sous-épineux, nerf circonflexe pour le petit rond) ces deux nerfs sont issus de la même racine (C5) du plexus brachial : ils peuvent donc être paralysés simultanément dans les élongations du plexus brachial par chute sur le moignon de l'épaule (accident de moto).

Mais la rotation dans l'articulation scapulo-humérale ne suffit pas à rendre compte de la totalité de la rotation du membre supérieur : il faut lui ajouter les changements d'orientation de l'omoplate (donc de la glène) lors des mouvements de translation latérale de l'omoplate (Fig. 75), ce changement d'orientation de 40 à 45° augmente d'autant l'amplitude de la rotation. Les muscles moteurs en sont :

- Pour la rotation externe (adduction de l'omoplate) *rhomboïdeus*, *trapezius* ;
- Pour la rotation interne (abduction de l'omoplate) *serratus anterior* (ou *major*) et *pectoralis minor*.

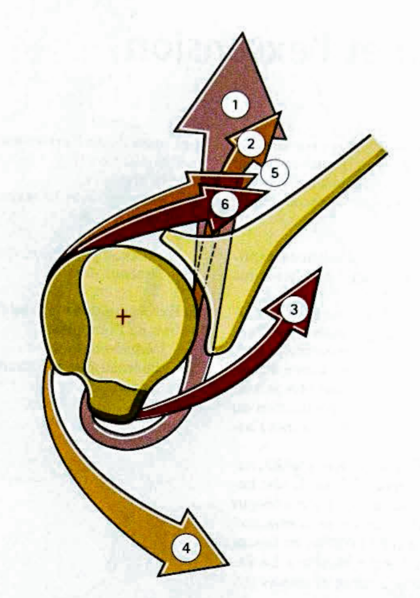


Fig. 111

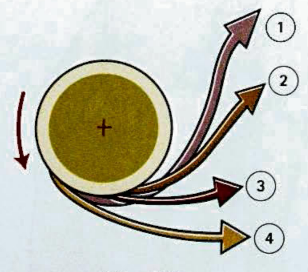


Fig. 112

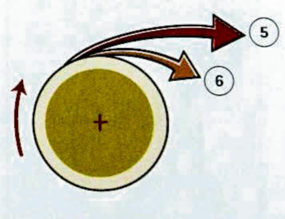


Fig. 113

L'adduction et l'extension

Les **muscles de l'adduction** sont figurés sur une vue antérieure (Fig. 114) et une vue postéro-externe (Fig. 115). Les légendes sont communes *teres major* **1**, *latissimus dorsi* **2**, *pectoralis major* **3**, *rhomboïdeus* **4**.

Dans le cartouche (Fig. 117): deux schémas expliquent le fonctionnement de deux couples musculaires de l'adduction:

- Fig. 117a. L'action synergique du couple *rhomboïdeus* **1**, *teres major* **2** est indispensable pour l'adduction. En effet, si le *teres major* se contracte seul, le membre supérieur offrant de la résistance à l'adduction, c'est l'omoplate qui va tourner vers le haut de son axe marqué d'une croix. La contraction du *rhomboïdeus* empêche cette rotation et permet l'action d'adduction du *teres major*.
- Fig. 117b. La contraction du *latissimus dorsi* **3**, adducteur très puissant, a tendance à luxer la tête humérale vers le bas (flèche noire). Le *triceps longus* **4**, qui est légèrement adducteur, en se contractant simultanément, s'oppose à cette luxation en faisant remonter la tête humérale (flèche blanche). Là encore s'observe une relation d'antagonisme-synergie.

Les muscles de l'extension sont figurés sur une vue postéro-externe (Fig. 116): cette extension s'effectue à deux niveaux:

1) **Extension dans la scapulo-humérale**
   - *teres* major **1**;
   - *teres minor* **5**;
   - faisceau postérieur, épineux, du *deltoïdeus* **6**, *latissimus dorsi* **2**.

2) **Extension dans la scapulo-thoracique**, par adduction de l'omoplate:
   - *rhomboïdeus* **4**;
   - faisceau moyen, transversal, du *trapezius* **7**, *latissimus dorsi* **2**.

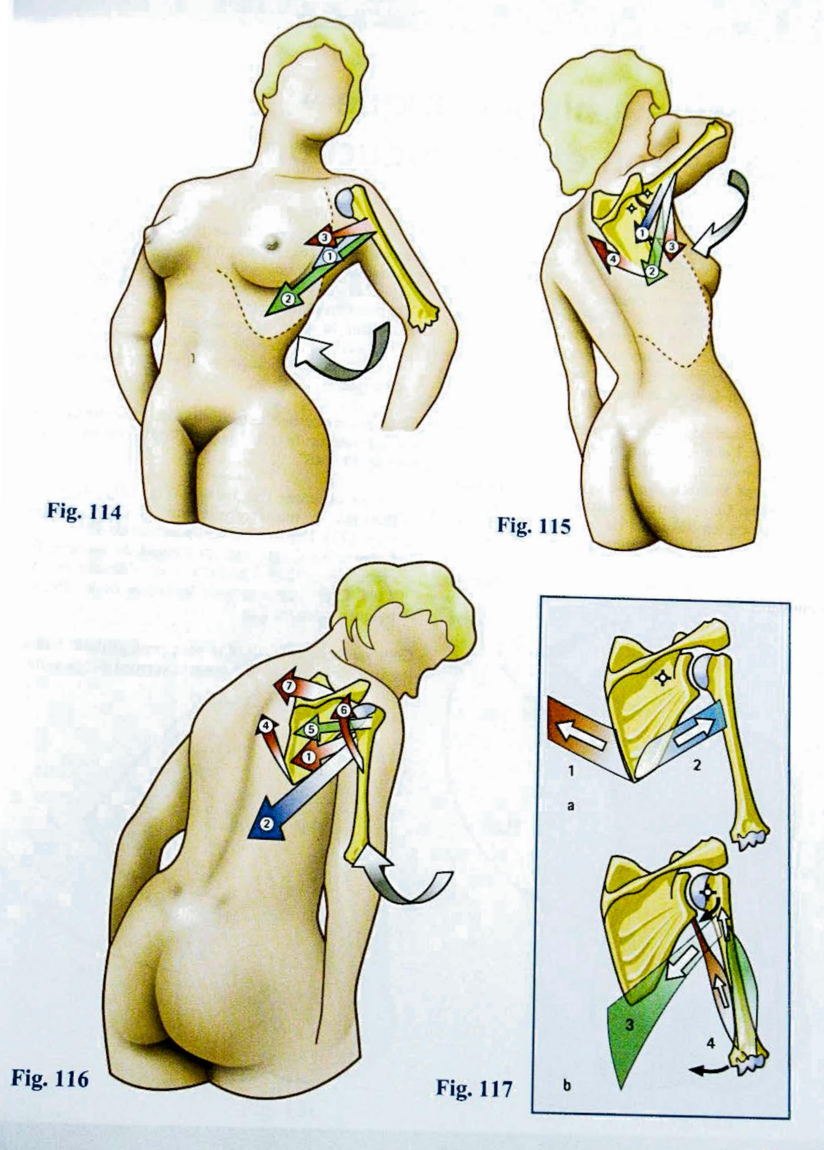


Fig. 114

Fig. 115

Fig. 116

Fig. 117

La mesure « hippocratique » de la flexion et de l'abduction

Les médecins n'ont pas toujours disposé des moyens d'examens existant actuellement, tels la radiologie et a fortiori la scanographie ou l'imagerie magnétique. Ces investigations perfectionnées sont fort utiles et souvent indispensables pour affiner un diagnostic ou préciser le siège et l'importance des lésions, mais lors de l'examen initial, le médecin doit pouvoir faire un diagnostic, une évaluation, comme au temps d'Hippocrate, fondateur de la médecine, armé seulement de ses cinq sens.
Il est très possible d'évaluer la fonction d'une articulation, sans l'aide d'aucun instrument de mesure, même un goniomètre (ou un rapporteur), **si l'on considère le corps humain comme son propre système de référence.** Ce système est capable de fonctionner en plein désert, en l'absence de tout appareil technique : **il faut « revenir à Hippocrate » !**

Ceci s'applique parfaitement en ce qui concerne l'épaule.

En ce qui concerne la **flexion** (Fig. 119, 120) et l'**extension** (Fig. 118), on peut retenir que :
- Lorsque les doigts sont au contact de la bouche (Fig. 119), la flexion de l'épaule est de **45°**. C'est la fonction d'alimentation ;
- Lorsque la main est posée au sommet du crâne (Fig. 120), la flexion de l'épaule est de **120°**. C'est la fonction de toilettage de la tête, se peigner, par exemple.

En ce qui concerne l'**extension** (Fig. 118) : lorsque la main repose sur la crête iliaque, l'épaule est en extension de **40 – 45°**.

En ce qui concerne l'**abduction** (Fig. 121, 122) :
- Lorsque la main repose sur la crête iliaque (Fig. 121), l'épaule est en abduction de **45°** ;
- Lorsque les doigts sont au contact du sommet du crâne (Fig. 122), l'abduction de l'épaule est de **120°**. C'est la fonction de toilettage de la tête, se peigner, par exemple.

Cette méthode est utilisable pour pratiquement toutes les articulations, comme nous le verrons par la suite.

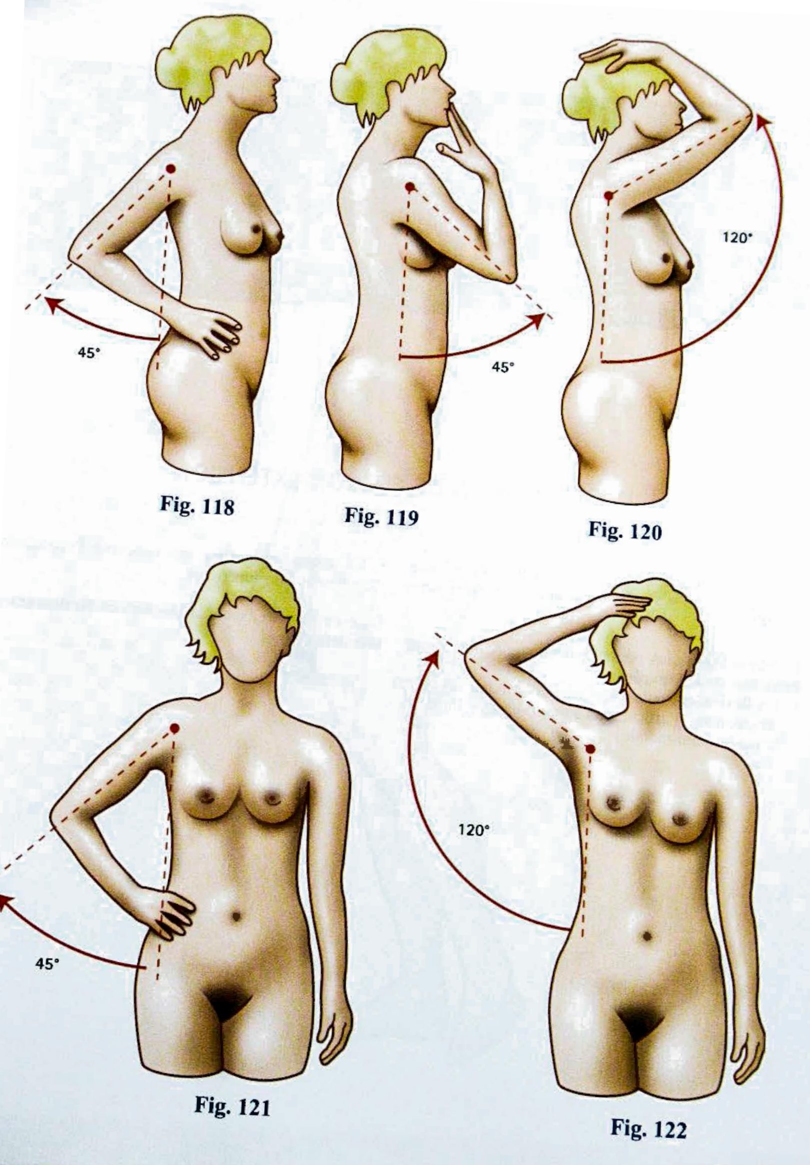


Fig. 118

Fig. 119

Fig. 120

Fig. 121

Fig. 122

Chapitre 2

LE COUDE

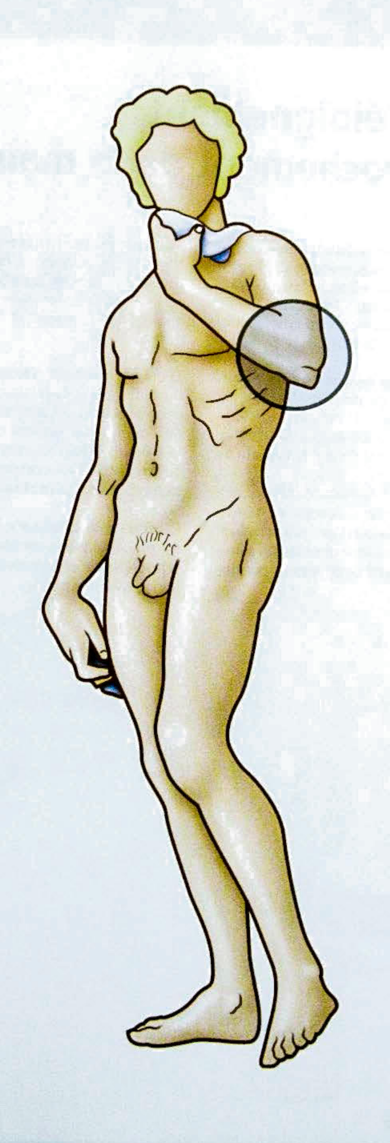
L'ARTICULATION DE FLEXION-EXTENSION

Anatomiquement, le coude ne représente qu'une seule articulation : il n'y a en effet qu'une seule cavité articulaire.

La physiologie nous permet par contre de distinguer **deux fonctions séparées :**

- **La flexion-extension**, qui nécessite le jeu de deux articulations : l'articulation huméro-ulnaire, l'articulation huméro-radiale ;
- **La prono-supination**, qui concerne l'articulation radio-cubitale supérieure.

Dans ce chapitre, seule la fonction de **flexion-extension** sera étudiée.



Fonction d'éloignement et de rapprochement de la main

Le coude est **l'articulation intermédiaire** du membre supérieur : réalisant la jonction mécanique entre le premier segment - **le bras** - et le deuxième - **l'avant-bras**. Elle permet à celui-ci, orienté dans les trois plans de l'espace grâce à l'épaule, de porter plus ou moins loin du corps son extrémité active : la main.

C'est grâce à la flexion du coude que l'homme peut porter les aliments jusqu'à sa bouche. Un aliment saisi en extension-pronation (Fig. 1) est porté à la bouche par un mouvement de flexion-supination ; en ce sens, on peut donc dire que le biceps est le **muscle de l'alimentation**.

On peut donc dire que la flexion du coude est essentielle à la **fonction d'alimentation** : un individu dont les deux coudes seraient bloqués en extension ou semi-extension serait dans l'incapacité de se nourrir par lui-même.

Le coude forme avec le bras et l'avant-bras un **compas** (Fig. 2) qui permet de rapprocher le poignet P_1, de l'épaule **E**, près de laquelle il vient presque au contact en P_2, tandis que le coude fléchit de C_1 en C_2. La main atteint alors facilement la région deltoïdienne et la bouche.

Dans un **montage télescopique** (Fig. 3), autre solution mécanique théorique et envisageable, la main ne peut en aucun cas atteindre la bouche car la distance minimum entre la main et la bouche est la somme de la longueur **L** du segment emboîté dans le tube d'emboîtement. Il faut compter en outre une longueur minimum **e** nécessaire pour maintenir la rigidité du montage.
C'est donc la **solution « compas »** qui, pour le coude, est plus logique et meilleure par rapport à la **solution télescopique**, à supposer que cette dernière soit biologiquement possible.

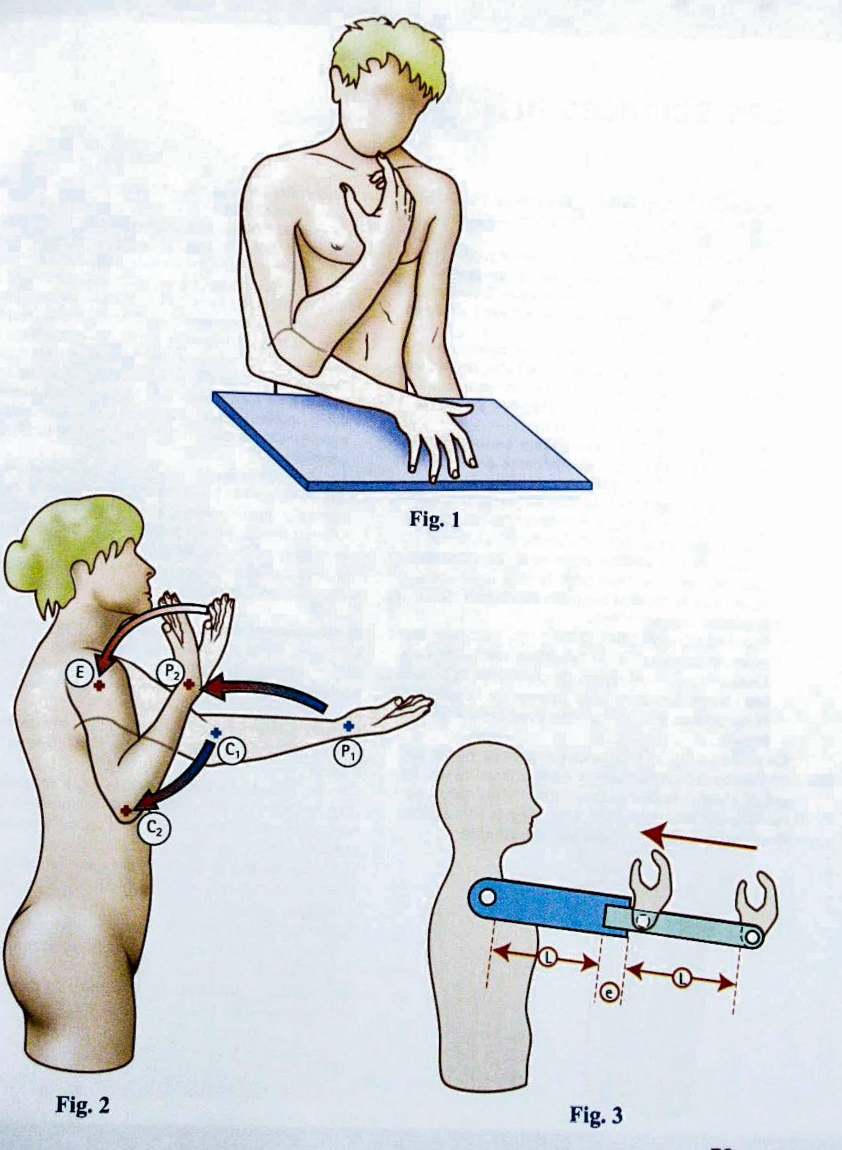


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Les surfaces articulaires

Au niveau de l'extrémité inférieure de l'humérus, il existe deux surfaces articulaires (Fig. 4 d'après Rouvière) :

- La **trochlée humérale** 2 en forme de poulie ou de diabolo (Fig. 4), avec une gorge 1 située dans un plan sagittal, encadrée par deux joues 2 convexes;
- Le **condyle huméral**, surface sphérique 3 située en dehors de la trochlée.

L'ensemble condyle-trochlée peut se comparer (Fig. 5) à l'association d'un diabolo et d'une balle, enfilés sur un même axe T. Cet axe représente - en première approximation - **l'axe de flexion-extension du coude**.

Deux remarques doivent être faites :

- **Le condyle n'est pas une sphère complète mais un hémisphère** (la moitié antérieure de la sphère) posé en avant de l'extrémité inférieure de l'humérus, s'articulant avec la cupule radiale. Conséquence : le condyle, à l'inverse de la trochlée, n'existe pas en arrière : il s'arrête à l'extrémité inférieure de l'os sans remonter en arrière. Cette surface permet non seulement la flexion-extension, mais aussi la rotation longitudinale autour de l'axe L (flèche verte);
- Entre condyle et trochlée (Fig. 5), se trouve une zone de transition 4, la **gouttière condylo-trochléenne** (Fig. 4) en forme de cône dont la grande base s'appuie sur la joue externe de la trochlée. Nous verrons l'utilité de cette zone condylo-trochléenne.

Ce schéma (Fig. 5) permet de comprendre que la partie interne de l'articulation ne comporte qu'un seul degré de liberté - la flexion extension - , alors que sa partie externe est dotée de deux degrés de liberté : **flexion-extension et rotation longitudinale**.

À l'extrémité supérieure des deux os de l'avant-bras, se situent deux surfaces correspondantes :

1) **La grande cavité sigmoïde du cubitus** (Fig. 4) qui s'articule avec la trochlée ; elle est donc inversement conformée c'est-à-dire qu'elle présente une crête mousse longitudinale 10 se terminant en haut par le bec de l'olécrane 11 et en bas et en avant par le bec de l'apophyse coronoïde 12 ; de chaque côté de cette crête, correspondant à la gorge de la trochlée, se trouvent deux versants correspondant aux joues trochléennes. La forme générale de cette surface articulaire est comparable à la surface d'une tôle ondulée courbe dont on n'aurait pris qu'un seul élément (double flèche rouge) : une nervure 10 et deux gouttières 11 ;
2) **La cupule radiale** (Fig. 4), face supérieure de la tête radiale, dont la concavité 14 possède la même courbure que le condyle 3 sur lequel elle s'adapte. Elle est limitée par un rebord 15 qui s'articule avec la zone condylo-trochléenne 4.

Ces deux surfaces forment un ensemble unique grâce au ligament annulaire 16 qui les maintient l'une contre l'autre.

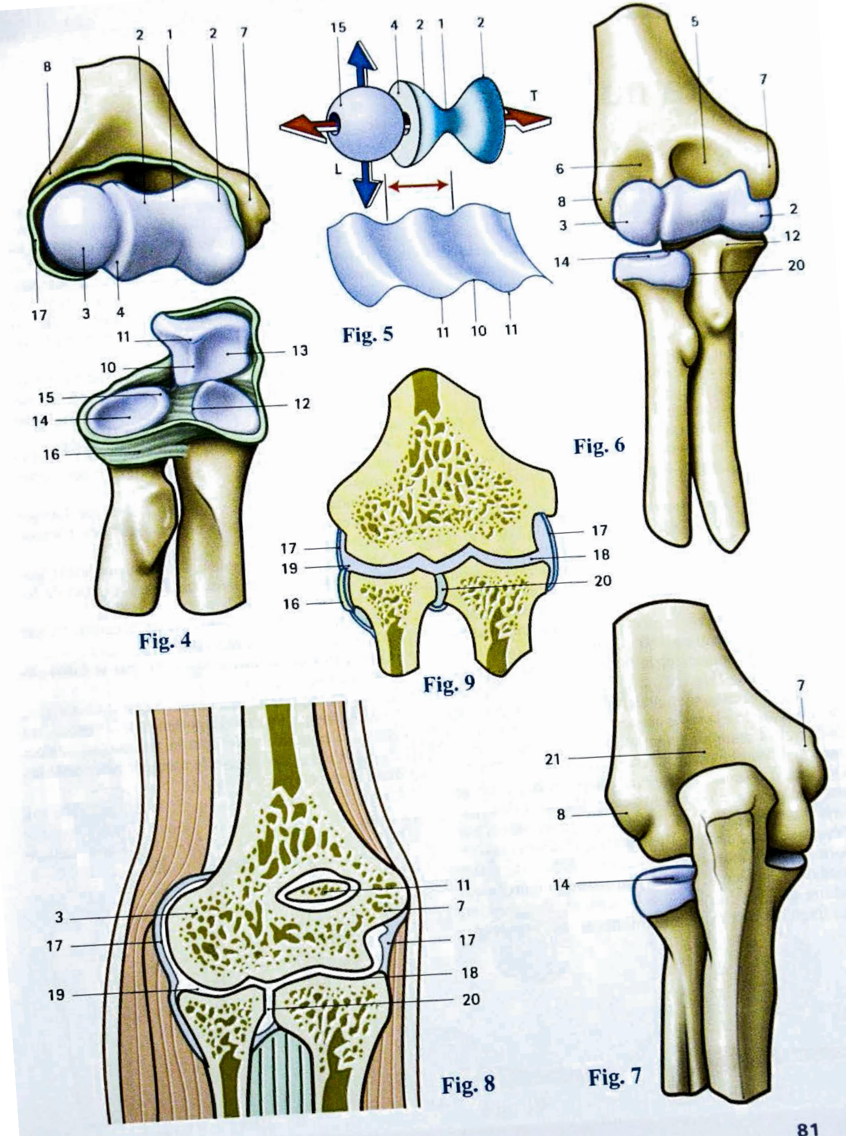
L'emboîtement des surfaces articulaires apparaît de face (Fig. 6) et de dos (Fig. 7). La vue antérieure (Fig. 6 : côté droit) montre la fossette coronoïdienne 5 au-dessus de la trochlée, et la fossette sus-condylienne 6, l'épitrochlée 7 et l'épicondyle 8.

La vue postérieure (Fig. 7 : côté gauche) montre en outre la fossette olécranienne 21 qui reçoit le bec de l'olécrane 11.

Sur la **coupe vertico-frontale de l'articulation** (Fig. 8, d'après Testut), on voit que la capsule 17 forme une seule cavité articulaire pour deux articulations fonctionnelles (Fig 9 : coupe schématique) :

1) **L'articulation de flexion-extension** (en bleu clair) avec l'interligne trochléo-cubitale 18 (Fig. 8) et l'interligne condylo-radiale 19 ;
2) **L'articulation radio-ulnaire supérieure** 20 (en bleu foncé) pour la prono-supination, complétée par le ligament annulaire 16.

On distingue aussi le bec de l'olécrane 11 dans la fossette olécranienne lors de l'extension.



Les légendes sont communes à toutes les figures

Palette humérale

On appelle **palette humérale**, l'extrémité inférieure de l'humérus (Fig. 13 : vue antérieure et 14 : vue postérieure), aplatie d'avant en arrière et supportant par son bord inférieur les surfaces articulaires, **trochlée et condyle**. Il est important de connaître la structure et la forme de cette palette humérale pour comprendre la physiologie du coude.

1) La palette humérale possède la **structure d'une fourche** supportant entre ses deux branches l'axe des surfaces articulaires (Fig. 15), un peu à la manière d'une fourche de bicyclette.

En effet, à sa partie moyenne, la palette humérale présente deux évidements :

- En avant, la **fossette sus-trochléenne**, qui reçoit le bec de l'apophyse coronoïde dans la flexion (Fig. 12 et 14) ;
- En arrière, la **fossette olécranienne**, qui reçoit le bec de l'olécrane dans l'extension (Fig. 10 et 13).

Ces deux fossettes sont indispensables pour que le coude ait une amplitude normale de flexion-extension : elles retardent le moment où les becs de la coronoïde ou de l'olécrane viennent buter contre la palette. Sans elles, la grande cavité sigmoïde de l'ulna, qui possède un développement de 180° d'arc, ne pourrait avoir qu'une faible course sur la trochlée, autour de la position moyenne (Fig. 23).

Ces deux fossettes sont quelquefois tellement profondes que la mince lamelle osseuse qui les sépare est perforée ; elles communiquent alors entre elles, comme dans une fourche de bicyelette.

Quoi qu'il en soit, la structure solide de la palette se situe de chaque côté des fossettes, réalisant deux piliers divergents (Fig. 13, 14, 15) qui se terminent sur l'épitrochlée en dedans, l'épicondyle en dehors et supportent dans leur intervalle l'ensemble articulaire condylo-trochléen. C'est cette structure en fourche qui rend si délicate la réduction et surtout la contention des fractures de l'extrémité inférieure de l'humérus.

2) La palette humérale est, dans son ensemble, **déjetée vers l'avant** (Fig. 16 : vue de profil des deux os). Le plan de la palette forme un angle de 45° environ sur l'axe de la diaphyse. De cette conformation découle une conséquence mécanique : la trochlée est située tout entière en avant de l'axe diaphysaire. C'est ce que l'on doit obtenir sur le cliché de profil après réduction des fractures de la palette humérale.

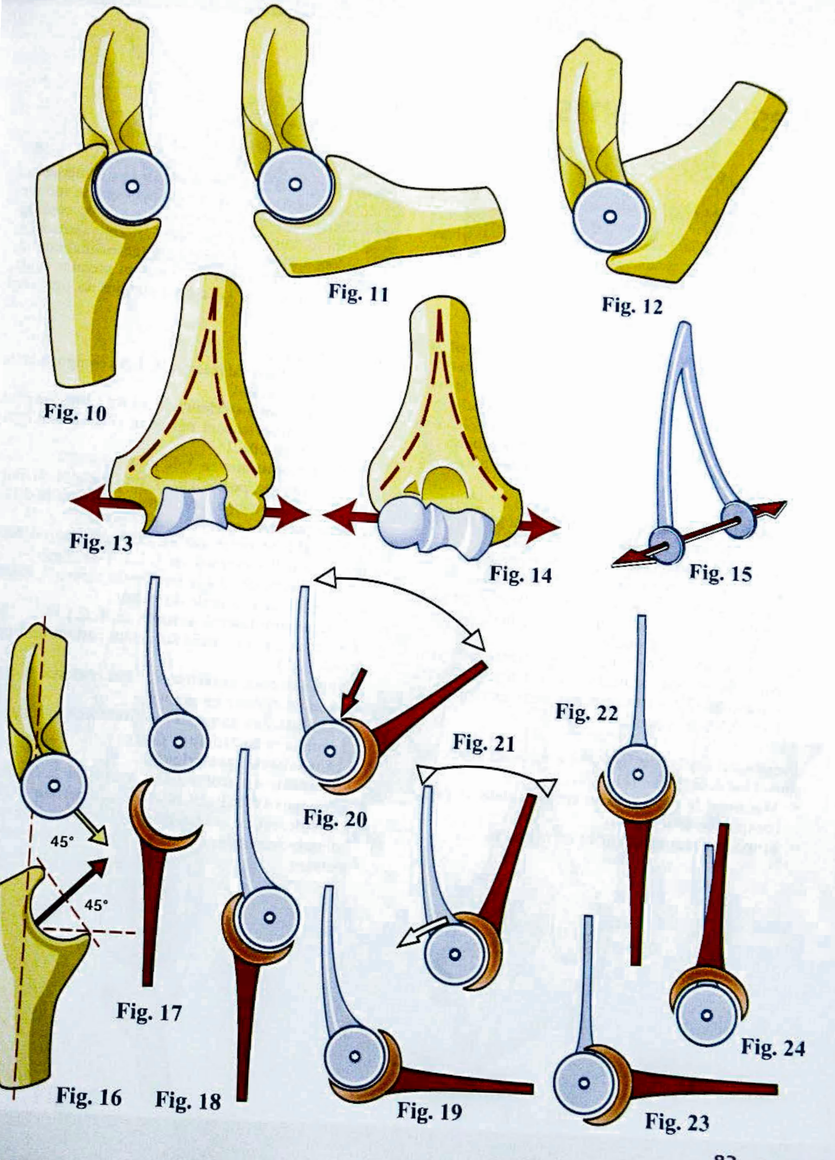
De même, la grande cavité sigmoïde de l'ulna, orientée en avant et en haut suivant un axe incliné à 45° sur l'horizontale est située elle aussi tout entière en avant de l'axe diaphysaire du cubitus (Fig. 17).

Ce déjettement des surfaces articulaires vers l'avant et leur orientation à 45° favorisent la flexion pour deux raisons (Fig. 21) :

1) La butée du bec coronoïdien n'a lieu que lorsque les deux os sont pratiquement parallèles (flexion théorique : 180°) ;
2) Même en flexion complète, il persiste un écart (double flèche) entre les deux os, ce qui permet de loger les masses musculaires.

Si ces deux conditions mécaniques n'existaient pas (Fig. 22), on voit très facilement :

- Que la flexion serait limitée à 90° par la butée coronoïdienne (Fig. 23) ;
- Et qu'en supposant que cette butée n'existe pas, grâce à une perforation importante de la palette, les deux os viendraient, lors de la flexion, au contact l'un de l'autre sans laisser la moindre place pour les masses musculaires (Fig. 24).


Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 13
Fig. 14
Fig. 15
45°
45°
Fig. 16
Fig. 17
Fig. 18
Fig. 19
Fig. 20
Fig. 21
Fig. 22
Fig. 23
Fig. 24

Les ligaments du coude

Les ligaments de l'articulation du coude ont pour fonction de maintenir les surfaces articulaires en contact et de guider le mouvement. Ce sont de véritables haubans, disposés de chaque côté de l'articulation : le **ligament latéral interne** (Fig. 25, d'après Rouvière) et le **ligament latéral externe** (Fig. 26, d'après Rouvière).

Dans l'ensemble, ils ont la forme d'un éventail fibreux étendu depuis l'une des deux saillies para-articulaires - épicondyle en dehors, épitrochlée en dedans - où le sommet se fixe en un point qui correspond grossièrement à l'axe XX' de flexion-extension (Fig. 27, d'après Rouvière), jusqu'au pourtour de la grande cavité sigmoïde de l'ulna où s'insère la périphérie de l'éventail.

Le **modèle mécanique du coude** peut alors être imaginé comme suit (Fig. 28) :

- En haut, la fourche de la palette humérale, supportant la poulie articulaire ;
- En bas, un demi-anneau (la grande cavité sigmoïde) solidaire du bras de levier anti-brachial et venant s'encastrer dans la poulie ;
- Le système ligamentaire est représenté par deux haubans (en vert), solidaires de la « tige » figurant l'avant-bras, et s'attachant aux deux extrémités de l'axe XX' de la poulie.

On conçoit facilement que ces « tendeurs » latéraux jouent un double rôle (Fig. 29) :

- Maintenir le demi-anneau encastré dans la poulie (coaptation articulaire) ;
- Empêcher tout mouvement de latéralité.

Il suffit (Fig. 30) que l'un des haubans, l'interne par exemple (flèche verte) se rompe pour que le mouvement de latéralité puisse se produire vers le côté opposé (flèche rouge) et pour que les surfaces articulaires perdent le contact : c'est le mécanisme habituel de la luxation du coude qui est, dans un premier stade, une entorse grave du coude par rupture du ligament latéral interne.

Dans le détail :

- **Le ligament latéral interne** (**L.L.I.**) comporte trois faisceaux (Fig. 25) :
  1) **Un faisceau antérieur** **1** dont les fibres les plus antérieures viennent renforcer (Fig. 27) le ligament annulaire **2** ;
  2) **Un faisceau moyen** **3**, le plus puissant ;
  3) **Un faisceau postérieur** **4**, ou ligament de Bardinet, renforcé par les fibres transversales du ligament de Cooper 5.

On distingue en outre sur ce schéma : l'épitrochlée d'où rayonnent l'éventail du L.L.I. l'olécrane **7** - la corde de Weitbrecht **8** - le tendon du biceps **9**, inséré sur la tubérosité bicipitale du radius ;

- Le **ligament latéral externe** (**L.L.E.**) (Fig. 26), formé lui aussi de trois faisceaux partant de l'épicondyle **13** :
  1) **Un faisceau antérieur** **10** qui renforce le ligament annulaire en avant ;
  2) **Un faisceau moyen** **11** qui renforce le ligament annulaire en arrière ;
  3) **Un faisceau postérieur** **12**.
- La **capsule** est renforcée en avant par le ligament antérieur **14** et le ligament oblique antérieur **15**. Elle est renforcée en arrière par des fibres transversales huméro-humérales et par des fibres huméro-olécraniennes.

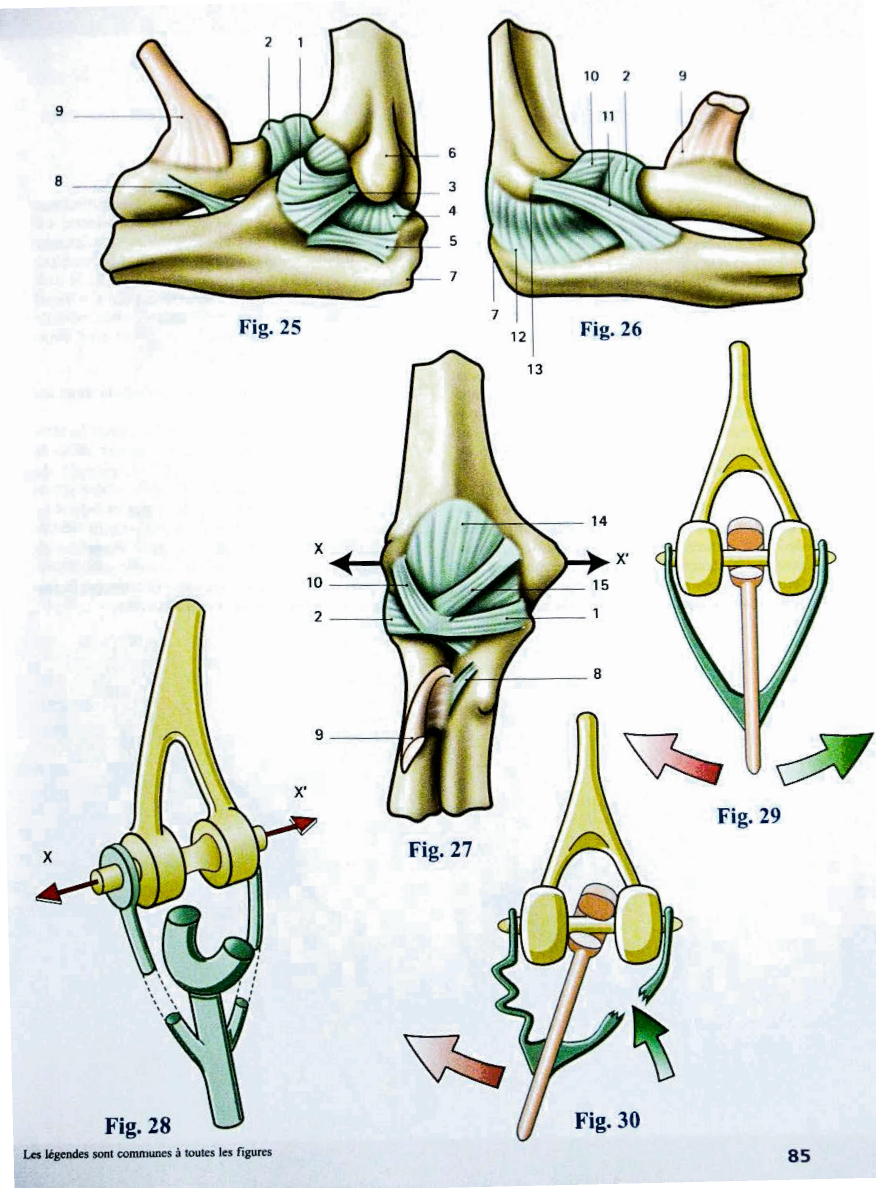


Fig. 25

Fig. 26

Fig. 27

Fig. 28

Fig. 29

Fig. 30

Les légendes sont communes à toutes les figures

La tête radiale

La forme de la tête radiale est entièrement conditionnée par sa fonction articulaire.

- **Fonction de rotation axiale** (voir plus loin : *prono-supination*) elle est sensiblement cylindrique ;
- **Fonction de flexion-extension autour de l'axe XX' du condyle :**
  - La tête radiale doit d'abord s'adapter (Fig. 31) à la forme sphérique du condyle huméral **A** : sa face supérieure **B** est donc concave, c'est la **cupule radiale.** Il a suffi pour cela de lui enlever **C** une calotte sphérique, dont le rayon de courbure est égal à celui du condyle ; lors de la prono-supination la cupule radiale peut ainsi pivoter sur le condyle huméral quel que soit le degré de flexion-extension du coude ;
  - Mais le condyle huméral est flanqué (Fig. 32), en dedans, d'une surface tronconique, **la zone condylo-trochléenne A**. Si bien que l'adaptation de la tête radiale lors de la flexion-extension nécessite l'abrasion d'un coin **C** de son pourtour interne, comme si un plan **B** tangent au tronc de cône avait détaché une portion du rebord de la cupule ;
  - Enfin, la tête radiale ne fait pas que glisser sur le condyle et la zone condylo-trochléenne en tournant autour de l'axe XX'. Elle peut tourner en même temps autour de son axe vertical (Fig. 24), lors de la prono-supination **B** : le méplat taillé sur le pourtour de la cupule **C** s'étend donc sur une portion de sa circonférence, comme si, lors de cette rotation **B**, un rasoir avait détaché un copeau sur le bord.

Rapports articulaires de la cupule radiale dans les positions extrêmes :

- **Dans l'extension complète** (Fig. 34), seule la moitié antérieure de la cupule s'articule avec le condyle ; en effet, la surface cartilagineuse du condyle s'arrête au niveau de la limite inférieure de la palette humérale et ne remonte pas en arrière ;
- **Dans la flexion complète** (Fig. 35), le pourtour de la tête radiale vient déborder en haut la surface du condyle et s'engager dans la fossette sus-condylienne (Fig. 6) beaucoup moins profonde que la fossette sus-trochléenne ou coronoïdienne.

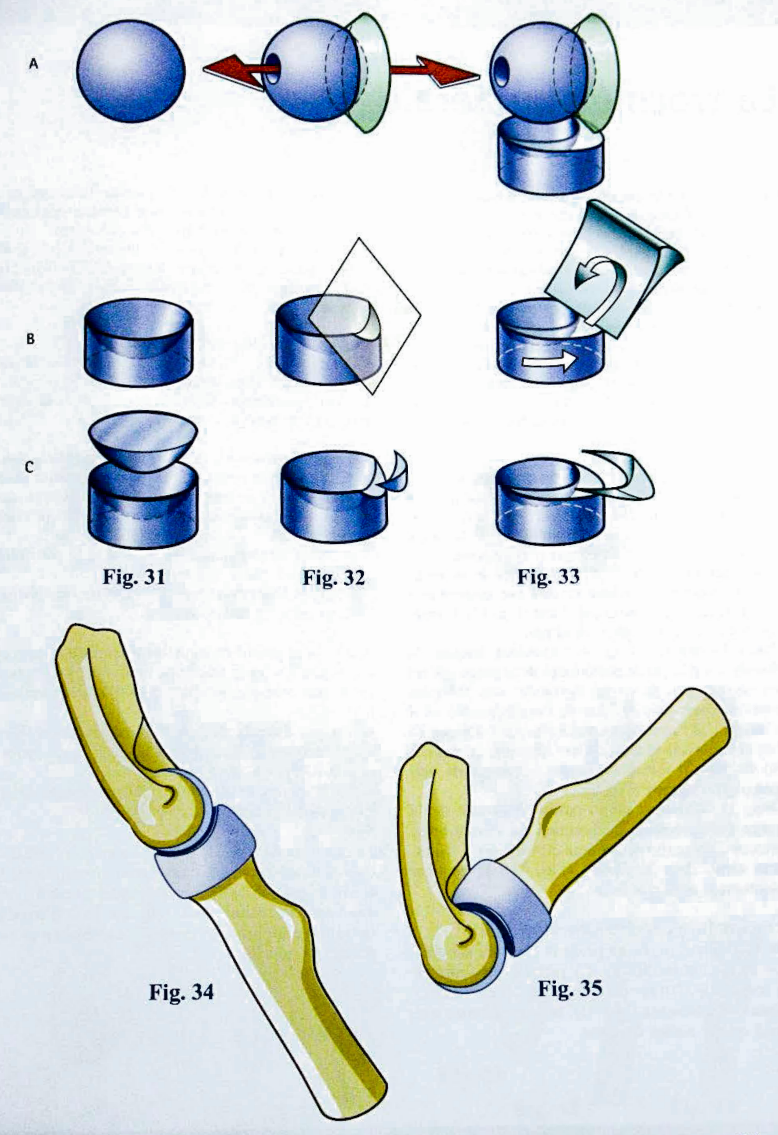


Fig. 31 Fig. 32 Fig. 33

Fig. 34

Fig. 35

La trochlée humérale

Lorsque le coude est en extension totale, l'axe de l'avant-bras forme un angle obtus, ouvert en dehors avec l'axe du bras. Il ne prolonge pas exactement celui du bras. Cet angle, nettement marqué chez la femme (Fig. 36) se nomme le **valgus physiologique du coude** ou encore **cubitus valgus**.

Il dépend de l'inclinaison de la gorge de la trochlée qui n'est pas située, comme il a été dit plus haut (p. 86), dans un plan sagittal. La réalité est un peu plus complexe. En effet, la gorge de la trochlée n'est pas verticale, mais oblique; de plus, cette obliquité est variable suivant les sujets. Le tableau (Fig. 39 à 43) résume ces différentes éventualités et leurs conséquences sur le plan physiologique.

Cas le plus fréquent (rangée supérieure A)

- **De face** (Fig. 39: vue antérieure de la trochlée), la gorge est verticale (flèche noire): de dos (Fig. 40: vue postérieure), la partie postérieure de la gorge est oblique en bas et en dehors (flèche noire).
- **Dans son ensemble** (Fig. 41) la gorge de la trochlée s'enroule en spirale autour de l'axe, comme cela est figuré avec les variations d'axe (Fig. 37). Conséquences sur le plan physiologique:
- **Dans l'extension** (Fig. 42) (schéma inspiré de Roud), c'est la partie postérieure de la gorge qui est en rapport avec la cavité sigmoïde; son obliquité entraîne donc celle de l'axe de l'avant-bras; d'où il s'ensuit que l'avant-bras est légèrement oblique en bas et en dehors et que son axe ne prolonge pas celui du bras: il forme avec celui-ci **l'angle de valgus physiologique** (Fig. 36 et 37);
- **Dans la flexion**, c'est la partie antérieure de la gorge qui détermine la direction de l'avant-bras: comme cette partie de la gorge est verticale, l'avant-bras vient, dans la flexion (Fig. 43), se projeter exactement devant le bras.

Cas moins fréquent (rangée moyenne B)

- **De face** (Fig. 39), la gorge de la trochlée est oblique en haut et en dehors. La partie postérieure de la gorge (Fig. 40) est oblique en bas et en dehors.
- **Dans son ensemble** (Fig. 41), la gorge dessine une vraie spirale autour de l'axe.
- **Dans l'extension** (Fig. 42), obliquité en bas et en dehors de l'avant-bras: c'est **le cubitus valgus physiologique**, comme dans le cas précédent.
- **Dans la flexion** (Fig. 43), l'obliquité de la partie antérieure de la gorge détermine l'obliquité de l'avant-bras qui se projette légèrement en dehors du bras.

Cas rare (rangée inférieure C)

- **De face** (Fig. 39), la gorge de la trochlée est oblique en haut et en dedans.

La partie postérieure de la gorge (Fig. 40) est oblique en bas et en dehors.

- Dans son ensemble (Fig. 41), la gorge de la trochlée dessine un cercle dont le plan est oblique en bas et en dehors, ou une spirale très fermée et penchée vers le dedans. Conséquences sur le plan physiologique:
  - **Dans l'extension** (Fig. 42): valgus physiologique;
  - **Dans la flexion** (Fig. 43): l'avant-bras vient se projeter en dedans du bras.

Autre conséquence de cette forme spiralée de la gorge, c'est qu'il n'y a pas un axe de la trochlée mais une série d'axes instantanés entre deux positions extrêmes (Fig. 37):

- **Un axe dans la flexion** f: il est perpendiculaire à la direction de l'avant-bras fléchi F (nous avons illustré le cas le plus fréquent);
- **Un axe dans l'extension** e: il est perpendiculaire à l'axe de l'avant-bras étendu E.

La direction de l'axe de flexion-extension varie de façon continue entre ces deux positions extrêmes, lors des mouvements de flexion-extension du coude, on dit que l'axe est évolutif, avec tout une série **d'axes instantanés** entre les deux positions extrêmes e et f rapportées au squelette (Fig. 38).

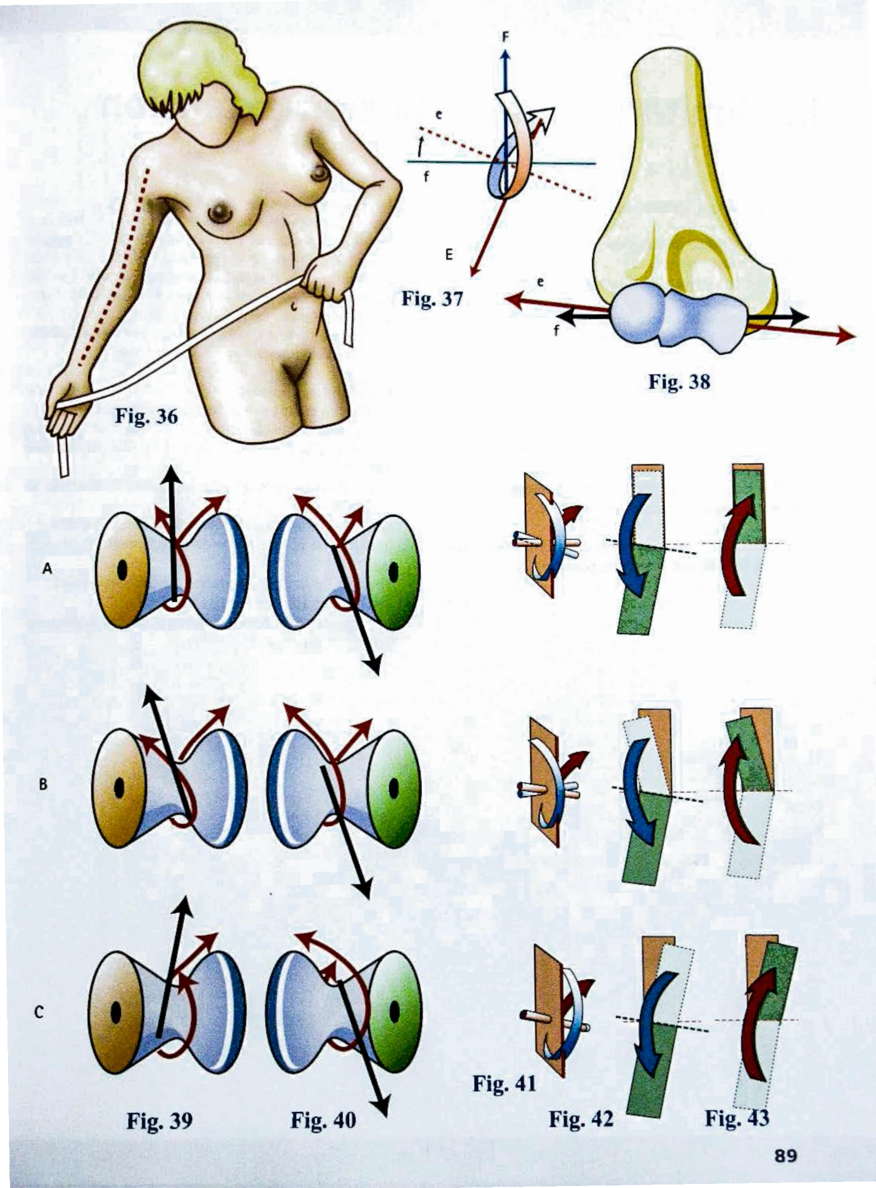


Fig. 36

Fig. 37

Fig. 38

Fig. 39

Fig. 40

Fig. 41

Fig. 42

Fig. 43

Les limitations de la flexion-extension

La limitation de l'extension (Fig. 44) est due à trois facteurs :

1) La **butée du bec olécranien** dans le fond de la fossette olécranienne ;
2) La **mise en tension de la partie antérieure de la capsule articulaire** ;
3) La **résistance due aux muscles fléchisseurs** (biceps, brachial antérieur et long supinateur).

Si l'extension se poursuit, l'un de ces freins doit se rompre :

- **Fracture de l'olécrane** **1** (Fig. 45) suivie de la déchirure capsulaire **2** ;
- L'olécrane **1** résiste (Fig. 46) mais la capsule **2** et les ligaments se rompent et il se produit une luxation postérieure **3** du coude. Les muscles restent en général intacts. Par contre, l'artère humérale peut être rompue ou, au minimum, contuse.

La **limitation de la flexion** se fait différemment suivant que la flexion est active ou passive.

Si la flexion est active (Fig. 47) :

- Le premier facteur de limitation est le contact des masses musculaires (flèches blanches) de la loge antérieure du bras et de l'avant-bras, durcies par la contraction. Ce mécanisme explique que la flexion active ne puisse guère dépasser 145°, et ceci d'autant plus que le sujet est plus musclé ;
- Les autres facteurs, butée osseuse et tension capsulaire n'interviennent pratiquement pas.

Si la flexion est passive (Fig. 48) sous l'action d'une force (flèche noire) qui « ferme » l'articulation :

- Les masses musculaires non contractées peuvent s'écraser l'une contre l'autre et la flexion dépasse 145° ;
- C'est alors qu'apparaissent les autres facteurs de limitation ;
- Butée de la tête radiale dans la fossette sus-condylienne et de la coronoïde dans la fossette sus-trochléenne ;
- Tension de la partie postérieure de la capsule ;
- Tension passive du triceps brachial.
- La flexion peut alors atteindre **160°** par augmentation d'un angle **a** (Fig. 47).

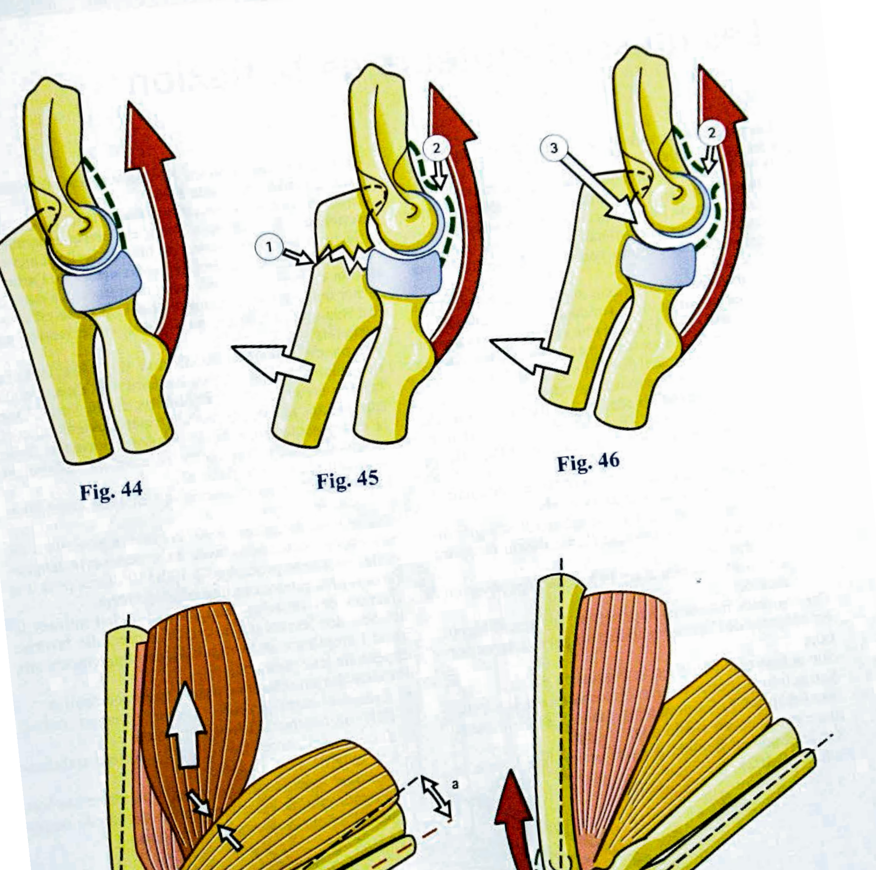


Fig. 44

Fig. 45

Fig. 46

Fig. 47

Fig. 48

Les muscles moteurs de la flexion

Les muscles moteurs de la flexion du coude sont au nombre de **trois**:

1) Le ***brachialis*** (brachial antérieur) **1** étendu du tubercule de l'apophyse coronoïde du cubitus à la face antérieure de l'humérus (Fig. 49): monoarticulaire, il est exclusivement fléchisseur du coude; c'est un des rares muscles du corps n'ayant qu'une seule fonction;
2) Le ***brachioradialis*** (long supinateur) **2** étendu de l'apophyse styloïde du radius au bord externe de l'humérus (Fig. 49): son rôle essentiel est la flexion du coude. Très accessoirement et seulement dans la pronation extrême il devient supinateur; il est même pronateur dans la supination extrême;
3) Le ***biceps brachii*** (biceps brachial) **3** est le muscle fléchisseur principal (Fig. 50). Son insertion inférieure est concentrée sur la tubérosité bicipitale du radius. Ses insertions supérieures ne se font pas sur l'humérus (c'est donc un muscle bi-articulaire), mais sur l'omoplate par **deux chefs**;
   - La longue portion **4** sur le tubercule sus-glénoïdien après avoir traversé l'articulation (chapitre 1: l'épaule);
   - La courte portion **5** sur le bec de l'apophyse coracoïde.

Par ses deux insertions supérieures, le muscle biceps est coapteur de l'épaule et abducteur par sa longue portion.

Son action essentielle est la flexion du coude.

Son action secondaire, mais importante, est la supination (chapitre 3: La prono-supination). Elle est maximum sur le coude fléchi à 90°.

Sur le coude en flexion, il a une action luxante sur le radius (p. 102).

L'efficacité des muscles fléchisseurs est maximum dans la flexion du coude à 90°.

En effet, lorsque le coude est étendu (Fig. 51), la direction de la force musculaire est presque parallèle (flèche rose) à la direction du bras de levier. La composante centripète C dirigée vers le centre de l'articulation est prépondérante, mais inefficace. La composante tangentielle ou transversale T, la seule efficace, est relativement faible, quasi nulle, si l'extension est complète.

Par contre, dans la demi-flexion (Fig. 52), la force musculaire devient perpendiculaire à la direction du bras du levier (flèche rose: biceps, flèche verte: long supinateur), la composante centripète devient nulle, et la composante tangentielle se confond avec la force musculaire elle-même: toute la force musculaire est alors utilisée pour la flexion.

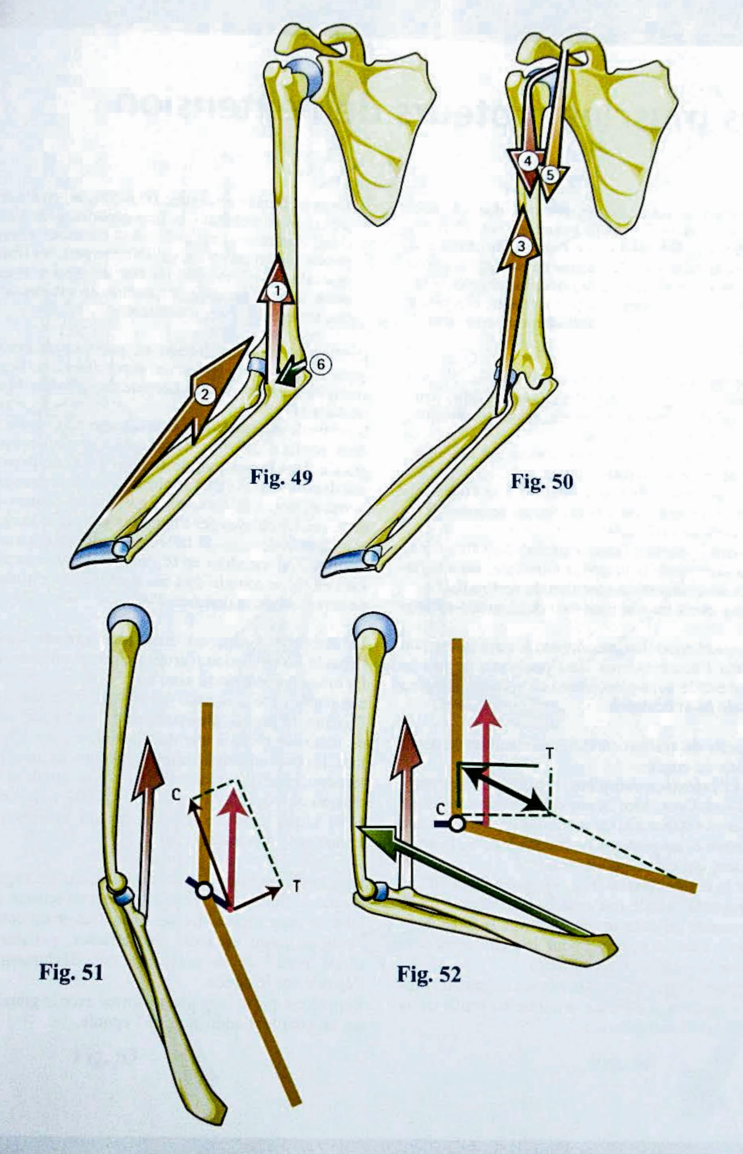
Cet angle d'efficacité maximum se situe entre 80 et 90° pour le biceps.

Pour le *brachioradialis*, à 90° la force musculaire n'est pas encore confondue avec la composante tangentielle; ceci ne se produit qu'à 100-110°, donc pour une flexion plus prononcée que pour le biceps.

L'action des muscles fléchisseurs se fait suivant le schéma des leviers du troisième genre. Elle favorise donc l'amplitude et la rapidité des mouvements aux dépens de leur puissance.

Il existe des muscles fléchisseurs très accessoires:

- *Extensor carpi radialis longus* (premier radial) (RI): au-dessous du long supinateur;
- *Anconeus* (l'anconé) **6** (Fig. 49), surtout stabilisateur externe actif du coude;
- *Pronator teres* (rond pronateur): sa rétraction lors du syndrome de Volkmann forme une corde empêchant l'extension complète du coude.


1
2
6
Fig. 49
4
5
3
Fig. 50
C
T
Fig. 51
T
C
Fig. 52

Les muscles moteurs de l'extension

L'extension du coude est, en pratique, due à l'action d'un seul muscle, le **triceps brachial** (Fig. 53 et 54). En effet (Fig. 60), l'action de l'***anconeus*** (anconé) **4**, bien que notable pour Duchenne de Boulogne, est négligeable sur le plan physiologique, en raison de la faiblesse de son moment d'action. Certains, cependant, lui font jouer un rôle de stabilisateur externe actif du coude.

Le triceps *brachialis* (triceps brachial) (Fig. 53 : vue postérieure et Fig. 54 : vue latérale) est formé de **trois corps charnus** qui se terminent par un seul tendon commun, fixé sur l'olécrane.
Les trois corps musculaires du triceps ont une insertion supérieure différente :

- Le *vastus medialis* (vaste interne) **1** se fixe sur la face postérieure de l'humérus au-dessous de la gouttière du nerf radial ;
- Le *vastus lateralis* (vaste externe) **2** se fixe sur le bord externe de la diaphyse humérale, essentiellement au-dessus de la gouttière du nerf radial ;

Ces deux chefs musculaires sont donc **mono-articulaires**.

- La *caput longus* (longue portion) **3**, qui s'insère non pas sur l'humérus mais sur l'omoplate, au niveau du tubercule sous-glénoïdien : ce chef est donc un **muscle bi-articulaire**.

L'efficacité du triceps est différente suivant le degré de flexion du coude :

- **Dans l'extension complète** (Fig. 55), la force musculaire se décompose en une composante centrifuge **C**, qui a tendance à luxer le cubitus en arrière et une composante tangentielle ou transversale **T**, la seule efficace, qui est prépondérante ;
- **Dans la légère flexion** (Fig. 56), entre 20 et 30°, la composante radiale (ou centripète) s'annule, et la composante efficace se confond avec la force musculaire : c'est la position pour laquelle le muscle possède le maximum d'efficacité ;
- Par la suite (Fig. 57), plus la flexion augmente, plus la composante **T** efficace diminue au profit de la composante centripète **C** ;
- **Dans la flexion complète** (Fig. 58), le tendon tricipital se réfléchit sur la face supérieure de l'olécrane comme sur une poulie ; ceci contribue à compenser sa perte d'efficacité. D'autre part, les fibres musculaires se trouvant en état de tension maximum, sa puissance de contraction en est augmentée, autre facteur compensateur.

L'efficacité du long triceps et, par voie de conséquence, celle du triceps entier, dépend aussi de la position de l'épaule : ce fait découle de sa nature bi-articulaire (Fig. 59).
Il est facile de constater que la distance qui sépare les deux points d'insertion de la longue portion est plus grande dans la position de flexion à 90° de l'épaule que dans la position bras vertical (le coude restant dans le même degré de flexion). En effet, les centres des deux cercles balayés par l'humérus **1** et par le long triceps **2** sont décalés. Si la longueur du triceps restait invariable, il viendrait en 0', mais l'olécrane se trouvant en 0_2, le muscle doit obligatoirement s'allonger passivement de la distance $0'$-0_2.

La force du triceps est donc **plus grande** lorsque l'épaule est en flexion (certains diraient antéposition). Le long triceps reporte ainsi sur l'extension du coude une partie de la puissance des muscles fléchisseurs de l'épaule (faisceaux claviculaires du grand pectoral et du deltoïde) c'est là une des illustrations du rôle des muscles bi-articulaires. Elle est plus grande aussi pour le mouvement qui associe l'extension du coude et l'extension de l'épaule (à partir de la position de flexion à 90°), par exemple mouvement du bûcheron qui frappe avec une hache.

Pour la même raison, la force du triceps est augmentée par la flexion de l'épaule qui met en tension préalable le long triceps. Le geste de donner un coup de poing en avant est ainsi plus efficace, par transfert d'une partie de la puissance des fléchisseurs de l'épaule sur le coude.
Rappelons que le long triceps forme avec le grand dorsal un couple d'adduction de l'épaule.

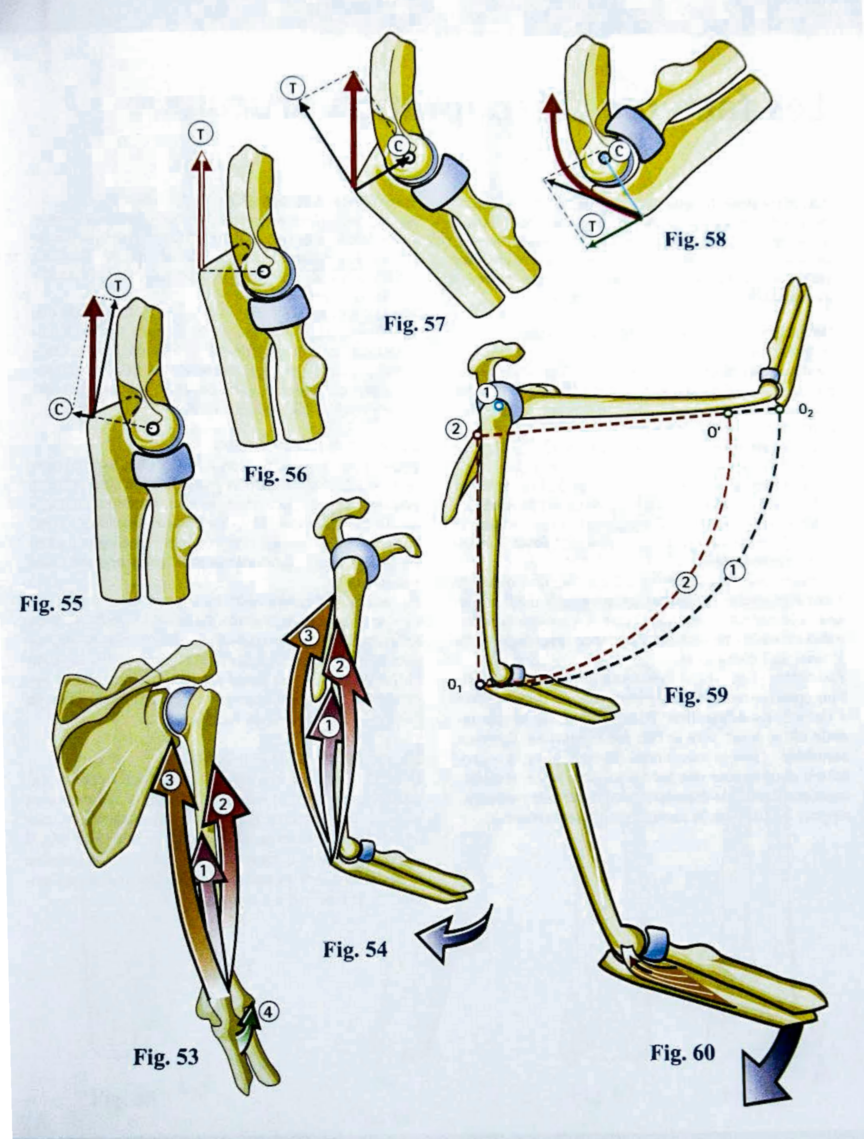


Fig. 55

Fig. 56

Fig. 57

Fig. 58

Fig. 59

Fig. 54

Fig. 53

Fig. 60

Les facteurs de coaptation articulaire

La coaptation longitudinale empêche l'articulation du coude en extension de se disloquer, soit lorsque s'exerce une force vers le bas comme lorsqu'on porte un seau d'eau, par exemple, soit lorsque s'exerce une force vers le haut comme lorsqu'on tombe, mains en avant, coude en extension, par exemple.

Résistance à la traction longitudinale (Fig. 61 et 62)

Le développement de la grande cavité sigmoïde ne dépassant pas 180° d'arc, la trochlée n'y est pas maintenue mécaniquement en l'absence des parties molles.
La coaptation est assurée par :

- Les **ligaments** : le ligament latéral interne (L.L.I.) **1** et le ligament latéral externe (L.L.E.) **2** ;
- Les **muscles** : non seulement ceux du bras : ***triceps brachii*** **3**, ***biceps brachii*** **4**, ***coraco-brachialis*** **5**, mais encore ceux de l'avant-bras : ***brachioradialis*** (long supinateur) **6**, muscles ***épicondyliens*** **7**, muscles ***épitrochléens*** **8**.

En extension complète (Fig. 62), le bec de l'olécrane vient s'accrocher au-dessus de la trochlée dans la fossette olécranienne, ce qui donne à l'articulation huméro-cubitale une certaine résistance mécanique dans le sens de l'élongation.
Par contre (Fig. 61), il faut remarquer que l'articulation condylo-radiale est mal configurée pour résister à des efforts de traction. Rien n'empêche la tête radiale de se luxer vers le bas par rapport au ligament annulaire : c'est le mécanisme invoqué pour la « pronation douloureuse des jeunes enfants ». Le seul élément empêchant la dislocation inférieure du radius par rapport à l'ulna est la **membrane interosseuse**.

Résistance à la pression longitudinale

Seule la résistance osseuse intervient mécaniquement :

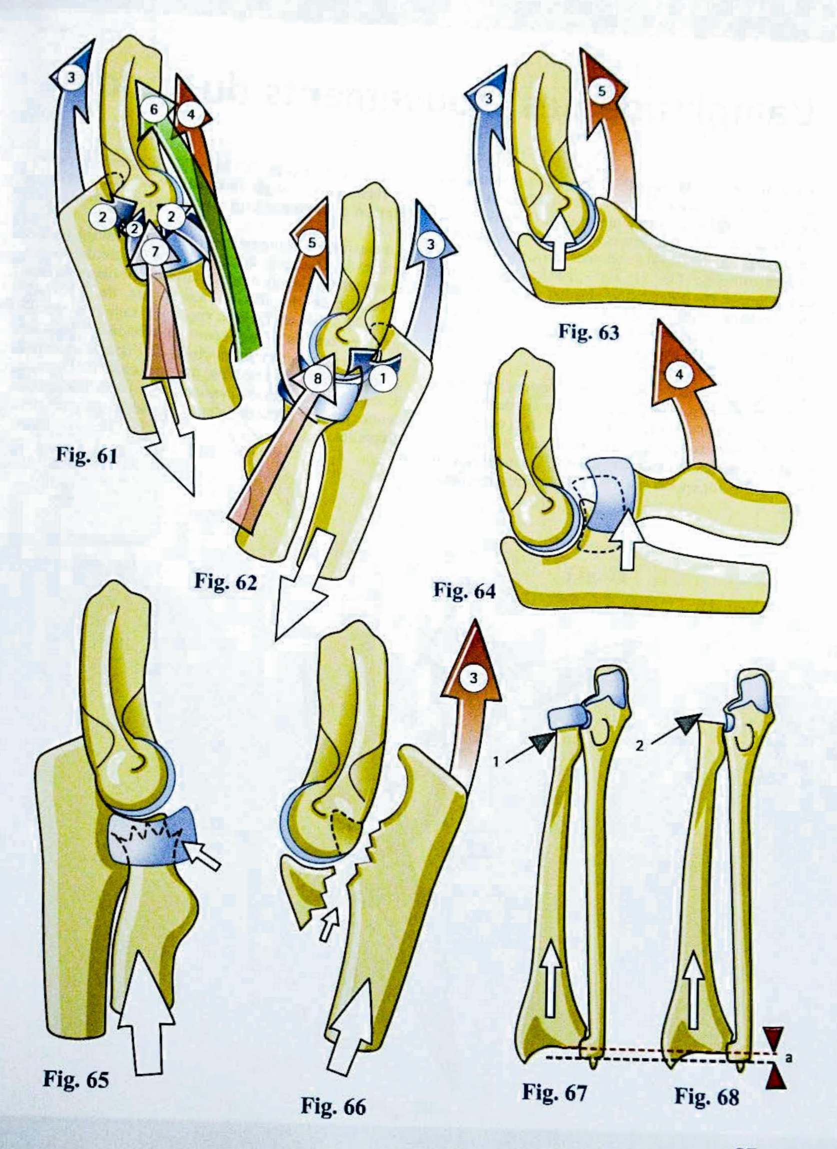
- Du côté du radius, c'est la **tête radiale** qui transmet les efforts de pression et qui se fracture (Fig. 65) : ici fracture par impaction du col dans la tête ;
- Du côté de l'ulna (Fig. 66), c'est la **coronoïde** qui transmet les pressions, d'où le nom **d'apophyse-console** qui lui a été donné par **Henlé.** Elle se fracture sous le choc, ce qui permet la luxation postérieure du cubitus. De ce fait, la luxation est incoercible, c'est-à-dire instable.

La coaptation en flexion

Dans la position de flexion à 90°, l'ulna est parfaitement stable (Fig. 63) car la grande cavité sigmoïde est encadrée par les deux insertions musculaires puissantes du ***triceps brachii*** **3** et du ***coraco-brachialis*** **5** qui appliquent les surfaces articulaires l'une contre l'autre (coaptation). L'***anconeus*** joue certainement aussi son rôle.
Le radius, par contre (Fig. 64), a tendance à se luxer vers le haut sous la traction du ***biceps brachii*** **4**. Seul le ligament annulaire empêche cette luxation de se produire. Lorsque ce ligament est rompu, la luxation du radius en haut et en avant est incoercible : elle se reproduit à la moindre tentative de flexion du bras du fait de la contraction du biceps.

Le Syndrome d'Essex-Lopresti

L'état de l'articulation radio-ulnaire supérieure retentit obligatoirement sur la fonction de la radio-ulnaire inférieure : lorsque la tête radiale est fracturée ou tassée (Fig. 67) ou lorsqu'elle a été réséquée (Fig. 68), il s'ensuit un raccourcissement du radius a qui entraîne la **dislocation de la radio-ulnaire inférieure**, à l'origine de troubles fonctionnels.


3
6
4
2
2
2
7
Fig. 61
5
3
8
1
Fig. 62
3
5
Fig. 63
4
Fig. 64
Fig. 65
3
Fig. 66
1
2
a
Fig. 67
Fig. 68

L'amplitude des mouvements du coude

La position de référence (Fig. 69) pour la mesure des amplitudes se définit comme suit : l'axe de l'avant-bras est situé dans le prolongement de l'axe du bras.
L'extension est le mouvement qui porte l'avant-bras en arrière. La position de référence correspond à l'extension complète (Fig. 69), il n'existe pas, par définition d'amplitude d'extension absolue du coude, sauf chez certains sujets possédant une grande laxité ligamentaire, comme les femmes et les enfants, qui peuvent effectuer une hyper-extension **hE** de 5 à 10° du coude **z** (Fig. 70).
Par contre, l'extension relative est toujours possible à partir de n'importe quelle position du coude fléchi.
Lorsque l'extension reste incomplète, on la cote négativement : par exemple une extension de - 40° correspond à un déficit d'extension de 40°, le coude restant fléchi à 40° lorsqu'on cherche à l'étendre complètement.

Sur ce schéma (Fig. 70) le déficit d'extension est - **y**, la flexion + **x**. L'angle Dr représente alors le déficit de flexion et la course utile de flexion-extension est x - y.
La flexion est le mouvement qui porte l'avant-bras en avant, de telle sorte que la face antérieure de l'avant-bras vienne à la rencontre de la face antérieure du bras. L'amplitude de flexion active est de 140-145° (Fig. 71). Elle est facile à apprécier, sans goniomètre, grâce au **test du poing fermé** : en effet, il existe la largeur du poing entre le moignon de l'épaule et le poignet, car le poignet ne vient pas au contact de l'épaule. L'amplitude de flexion passive est de 160°. Elle est obtenue lorsque l'examinateur pousse le poignet vers l'épaule.

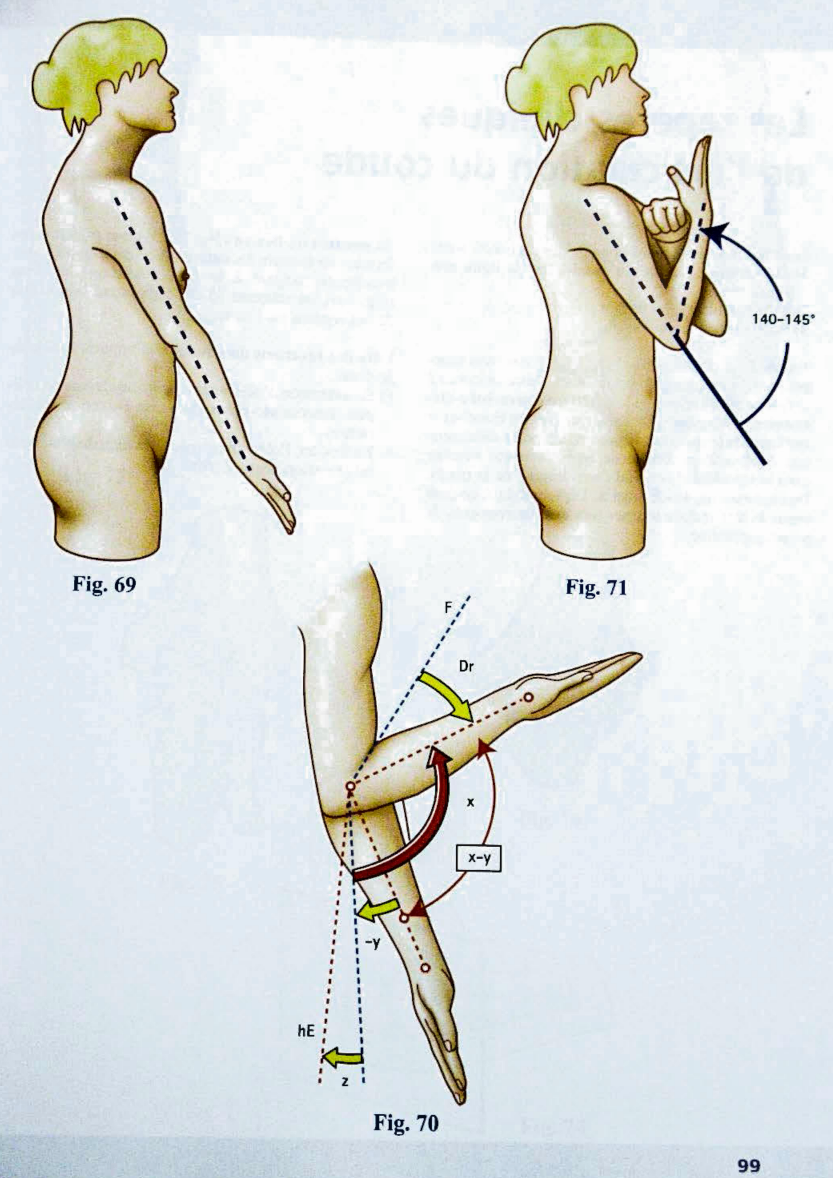


Fig. 69

Fig. 71

Fig. 70

Les repères cliniques de l'articulation du coude

Les trois repères visibles et palpables du coude sont :

1) **L'olécrane 2, saillie du coude, sur la ligne médiane** ;
2) **L'épitrochlée 1**, en dedans ;
3) **l'épicondyle 3**, en dehors.

En **position d'extension** (Fig. 72, 75), ces trois repères sont alignés sur une horizontale. Entre olécrane 2 et épitrochlée 1 se trouve la **gouttière épitrochléo-olécranienne** où passe verticalement (flèche blanche) le **nerf cubital** : un choc violent en ce point détermine une douleur bien connue de type électrique irradiée dans le territoire du cubital (bord interne de la main). Du côté externe, au-dessous de l'épicondyle 3, on peut sentir la tête radiale tourner lors des mouvements de prono-supination.

En **position de flexion** (Fig. 73, 76), ces trois repères forment un triangle équilatéral, situé dans un plan vertico-frontal tangent à la face postérieure du bras (Fig. 74) ; les schémas 75 et 76 montrent la position de ces repères sur l'os sec.

Lors des luxations du coude, ces rapports sont bouleversés :

- En extension, l'olécrane remonte au-dessus de la ligne épicondylo-épitrochléenne (luxation postérieure) ;
- En flexion, l'olécrane recule en arrière du plan frontal (luxation postérieure).

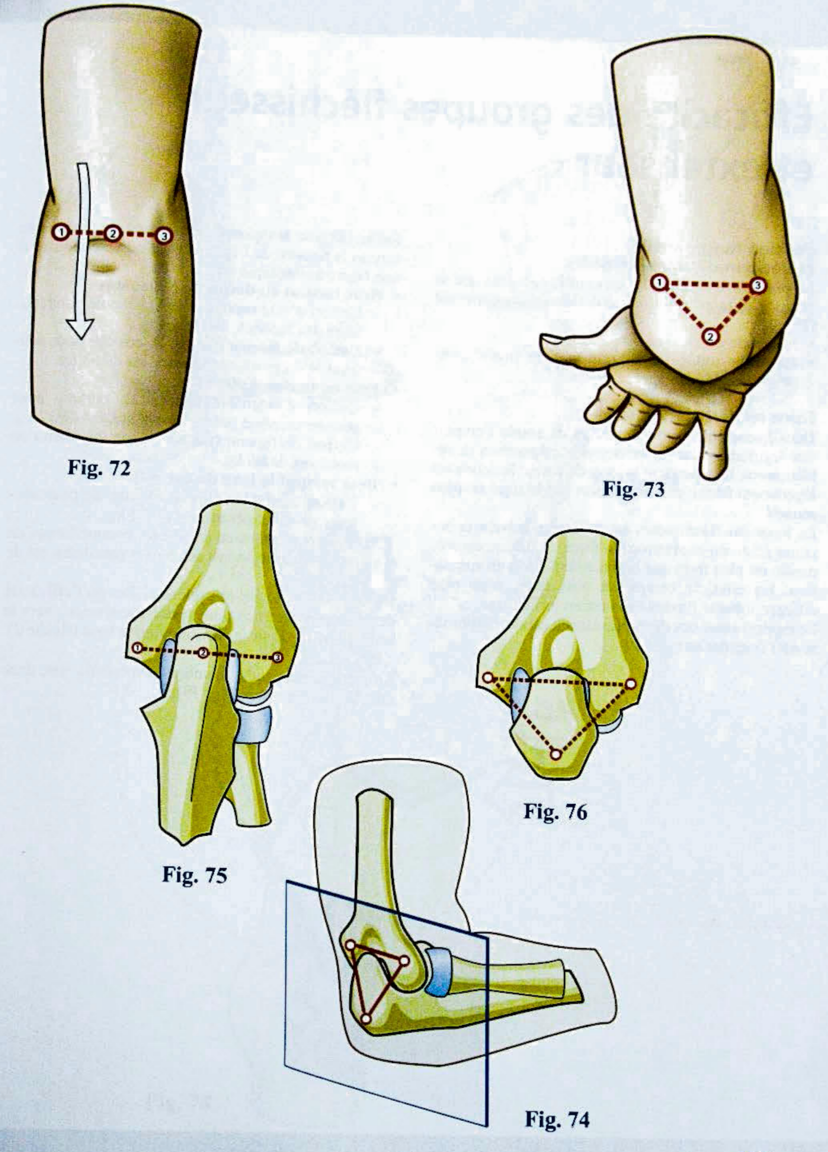


Fig. 72

Fig. 73

Fig. 75

Fig. 76

Fig. 74

Efficacité des groupes fléchisseur et extenseur

Position fonctionnelle et position d'immobilisation

La **position fonctionnelle du coude**, de même que sa position d'immobilisation, se définissent comme suit (Fig. 77) :

- Le coude est fléchi à 90° ;
- La prono-supination est indifférente (main comprise dans le plan vertical).

Force relative des muscles

Dans l'ensemble, les fléchisseurs du coude l'emportent légèrement sur les extenseurs : en position de relâchement, bras pendant le long du corps, le coude est légèrement fléchi, et d'autant plus que le sujet est **plus musclé.**

La force des fléchisseurs est différente suivant la position de prono-supination : la force de flexion en pronation est plus forte que la force de flexion en supination. En effet, le biceps est plus étiré, donc plus efficace lorsque l'avant-bras est en pronation.

Le rapport entre ces deux puissances est de : 5 (pronation)/3 (supination).

Enfin, la force des groupes musculaires est différente suivant la position de l'épaule. Ceci est schématisé sur une figure synthétique (Fig. 78) :

- **Bras vertical au-dessus de l'épaule H**
  - L'effort d'extension (flèche **1**), comme pour soulever des haltères, est de 43 kg ;
  - L'effort de flexion (flèche **2**), comme pour soulever le corps en suspension, est de 83 kg.
- **Bras en flexion à 90° AV**
  - L'effort d'extension (flèche **3**), comme pour pousser un objet pesant devant soi, est de 37 kg. L'effort de flexion (flèche **4**), comme lorsqu'on rame, est de 66 kg.
- **Bras vertical le long du corps B**
  - L'effort de flexion (flèche **5**), comme pour soulever un objet pesant, est de 52 kg ;
  - L'effort d'extension (flèche **6**), comme lorsqu'on se soulève au-dessus des barres parallèles, est de 51 kg.

Il y a donc des positions préférentielles où l'efficacité des groupes est maximum : pour l'extension, vers le bas (flèche **6**), pour la flexion, vers le haut (flèche **2**).

La musculature des membres supérieurs est donc adaptée au **grimper** (Fig. 79).

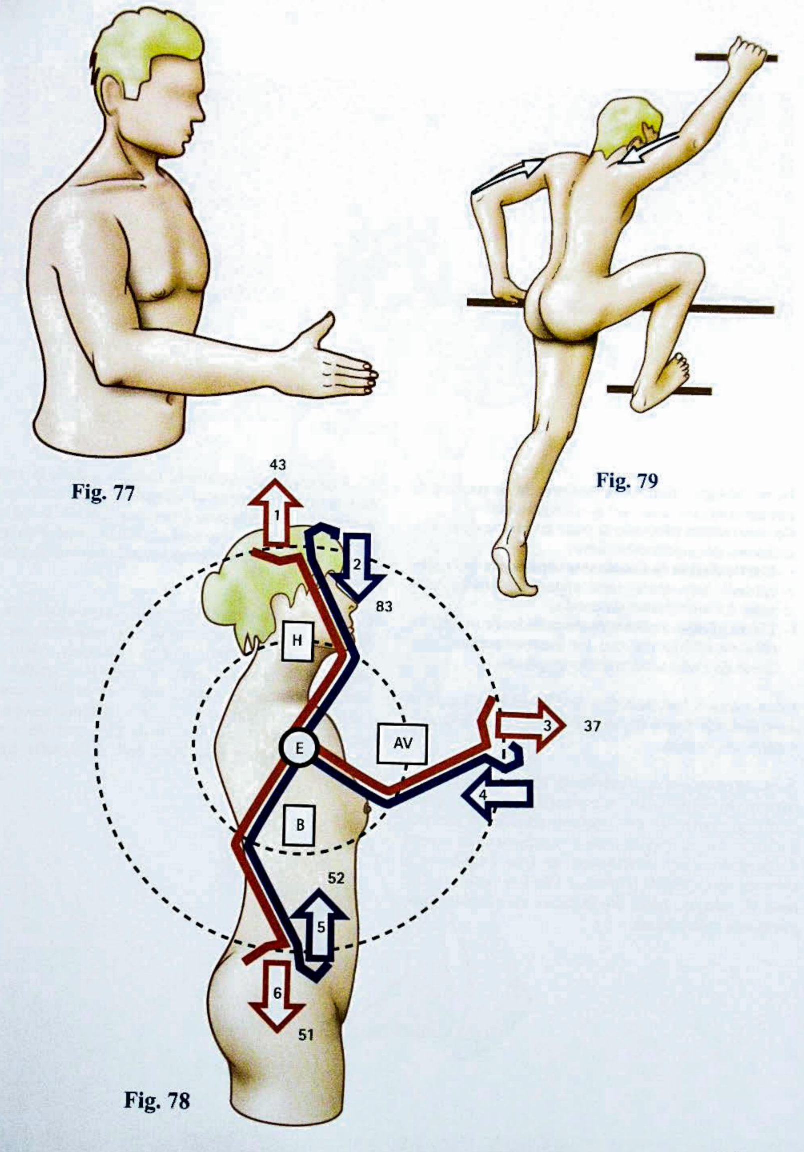


Fig. 77

Fig. 79

Fig. 78

Chapitre 3

LA PRONO-SUPINATION

La prono-supination est le mouvement de rotation de l'avant-bras autour de son axe longitudinal.
Ce mouvement nécessite la mise en jeu de deux articulations mécaniquement liées :

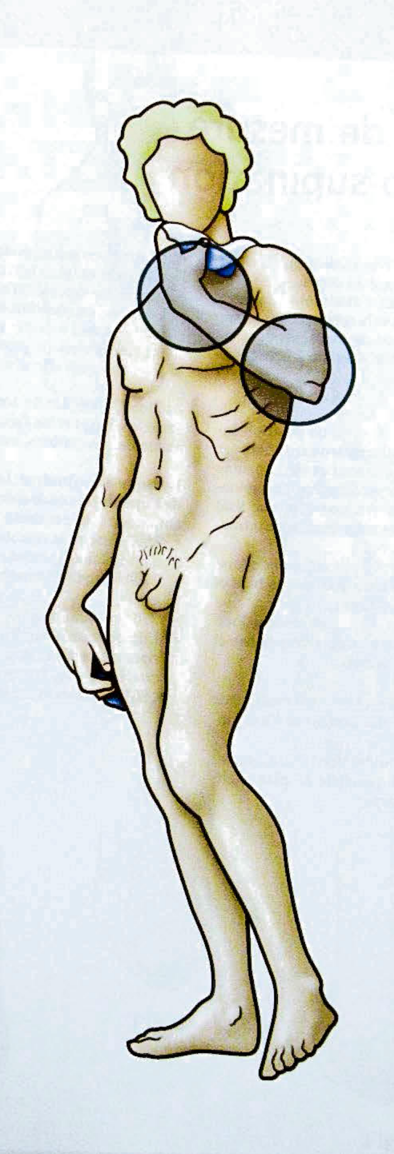
- **L'articulation radio-ulnaire supérieure** (ou radio-cubitale supérieure), qui appartient anatomiquement à l'articulation du coude ;
- **L'articulation radio-ulnaire inférieure** (ou radio-cubitale inférieure), qui est anatomiquement distincte de l'articulation radio-carpienne.

Cette rotation longitudinale de l'avant-bras introduit **un troisième degré de liberté** dans le complexe articulaire du poignet.

Ainsi, la main, qui est **l'extrémité effectrice du membre supérieur**, peut-elle être présentée sous n'importe quel angle pour saisir ou soutenir un objet. Ce dispositif anatomique se substitue à la présence, au niveau du poignet, d'une articulation de type énarthrose à trois degrés de liberté (comme à l'épaule), qui, comme nous le verrons, aurait été la cause de grandes complications mécaniques.

La rotation longitudinale du radius est donc **la solution à la fois logique et élégante,** qui a pour seule conséquence la présence d'un deuxième os, le radius, supportant la main à lui seul et tournant autour du premier, l'ulna, grâce aux deux articulations radio-ulnaires.

Cette architecture du deuxième segment, aussi bien au niveau du membre antérieur que du postérieur, est apparue il y a 400 millions d'années, dans la phylogénèse, lorsque certains poissons, quittant la mer, ont colonisé la terre ferme en se transformant en **amphibiens tétrapodes**, grâce à la modification de leurs nageoires. Notre lointain ancêtre, sorti de la mer, le crossoptérygien, était donc doté d'une telle disposition.



Conditions de mesure de la prono-supination

La prono-supination ne peut être étudiée que lorsque le coude est fléchi à 90° et collé au corps.
En effet, si le coude est étendu, l'avant-bras se trouve dans le prolongement du bras et la rotation du bras sur son axe longitudinal, grâce aux mouvements de rotation externe-interne de l'épaule, s'ajoute à la rotation longitudinale de l'avant-bras.

Le coude étant fléchi à 90° :

- La **position de référence** (Fig. 1), ou **position intermédiaire** ou encore **position zéro** est définie par la direction du pouce vers le haut et de la paume vers le dedans, n'est ni en pronation ni en supination. C'est à partir de cette position zéro que sont mesurées les amplitudes des mouvements de prono-supination ;
- La **position de supination** (Fig. 2) est réalisée lorsque la paume de la main est dirigée vers le haut et que le pouce se trouve en dehors ;
- La **position de pronation** (Fig. 3) est réalisée lorsque la paume de la main « regarde » vers le bas et que le pouce se trouve en dedans.

En effet, lorsqu'on regarde l'avant-bras et la main « de bout », c'est-à-dire dans le prolongement de l'axe longitudinal :

- La main, **en position intermédiaire** (Fig. 4), est située dans un plan vertical, parallèle au plan sagittal, plan de symétrie du corps ;
- La main, **en position de supination** (Fig. 5), est située dans un plan horizontal ; l'amplitude du mouvement de supination est donc de 90° ;
- La main, **en position de pronation** (Fig. 6), n'atteint pas tout à fait le plan horizontal ; l'amplitude du mouvement de pronation est de 85° (nous verrons pourquoi elle n'atteint pas tout à fait 90°).

Au total, l'amplitude totale de la prono-supination vraie, c'est-à-dire ne faisant intervenir que la rotation axiale de l'avant-bras, est voisine de 180°.

Lorsque s'y ajoutent les mouvements de rotation de l'épaule, le coude étant complètement étendu, cette amplitude totale atteint :

- 360° lorsque le membre supérieur est vertical, pendant le long du tronc ;
- 270° lorsque le membre supérieur est en abduction à 90° ;
- 270° en flexion à 90° ;
- Elle dépasse à peine 180° lorsque le membre supérieur est vertical, érigé en abduction complète. Ceci confirme que, lorsque le bras est en abduction à 180°, la rotation axiale de l'épaule est quasi nulle.

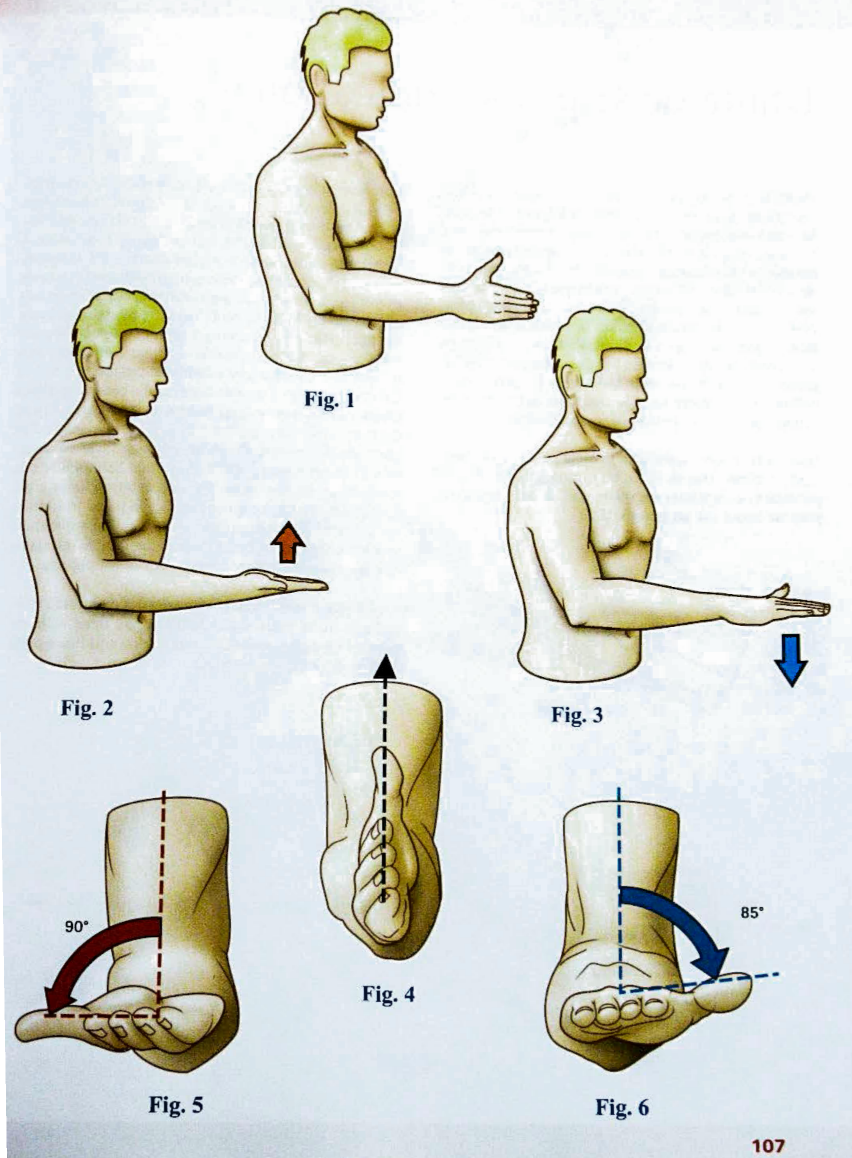


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

Utilité de la prono-supination

Parmi les sept degrés de liberté que comporte la chaîne articulaire du membre supérieur, de l'épaule à la main, la prono-supination est l'un des plus importants car il est indispensable au contrôle d'attitude de la main, qui permet la présentation optimum de la main pour saisir un objet dans un secteur sphérique d'espace centré sur l'épaule et le porter à la bouche : la prono-supination est donc indispensable à la **fonction d'alimentation**. Il permet aussi à la main d'atteindre n'importe quel point du corps dans un but de protection ou d'hygiène : c'est la **fonction de toilettage**. La prono-supination joue en outre un rôle essentiel dans toutes les actions de la main, **le travail**, en particulier.

Grâce à la prono-supination, la main peut (Fig. 8) soutenir un plateau ou un objet, en supination, ou bien, en pronation, comprimer un objet vers le bas ou encore prendre appui sur un objet stable.

Elle permet aussi d'imprimer un mouvement de rotation dans les prises centrées et rotatives, comme lors de l'utilisation d'un tournevis (Fig. 9) où l'axe de l'outil coïncide avec l'axe de prono-supination. Grâce à l'obliquité de la prise à pleine paume des manches (Fig. 10), la prono-supination modifie l'orientation de l'outil par le mécanisme de la rotation conique, conséquence de l'asymétrie de la main, le manche pouvant se situer dans l'espace sur un segment de cône centré par l'axe de prono-supination Le marteau vient alors frapper le clou sous une incidence réglable.
On découvre ici l'un des aspects du **couplage fonctionnel entre prono-supination et radio-carpienne** dont un autre exemple peut être observé dans le fait que l'abduction-adduction du poignet varie en fonction de la prono-supination : l'attitude habituelle de la main en pronation ou en position intermédiaire c'est l'inclinaison cubitale qui « centre » la pince tridigitale sur l'axe de prono-supination, alors qu'en supination la main se porte plutôt en inclinaison radiale qui favorise la prise de soutien, comme porter un plateau.

Ce couplage fonctionnel oblige donc à intégrer la physiologie de la radio-cubitale inférieure dans celle du poignet bien que, mécaniquement, elle soit liée à celle de la radio-ulnaire supérieure.

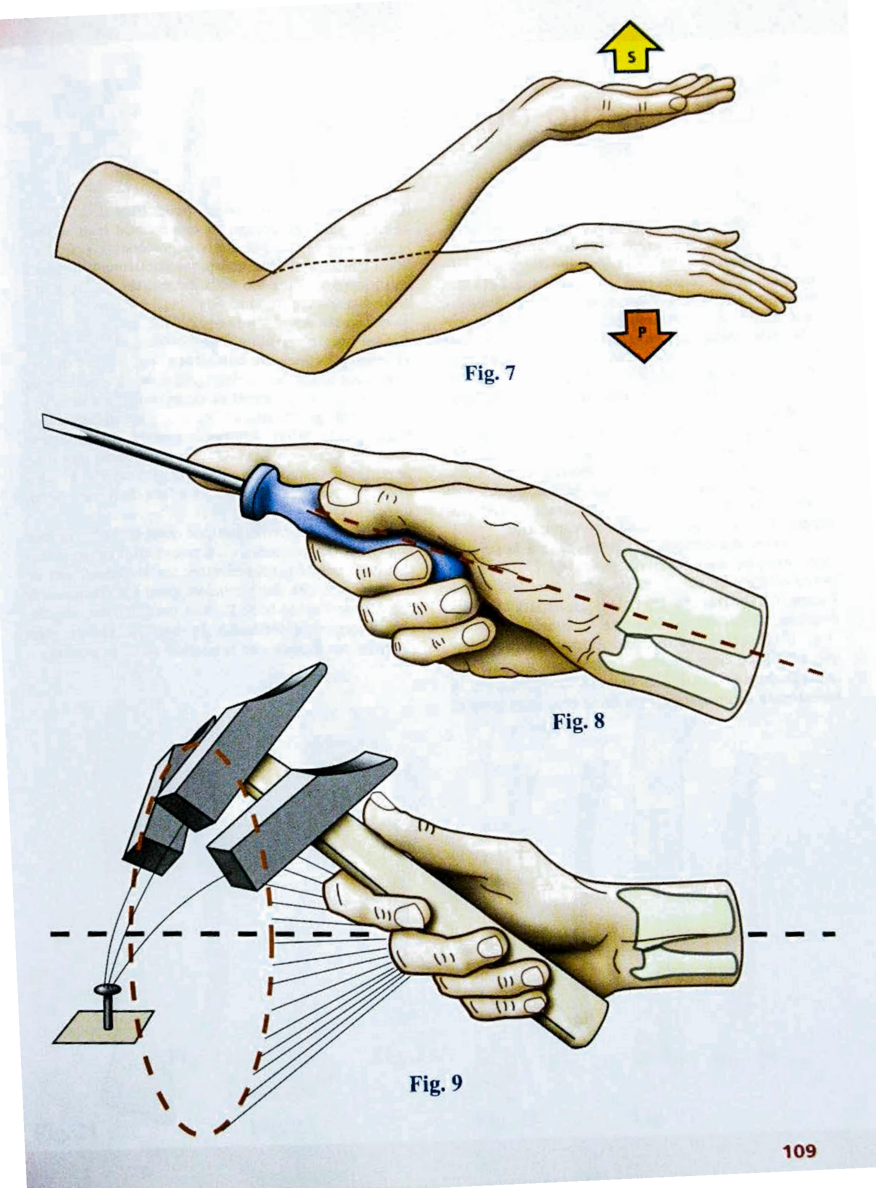


Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

Le cadre radio-ulnaire

Disposition générale

On considère maintenant que les deux os de l'avant-bras (Fig. 10) forment un **cadre radio-ulnaire** (Fig. 11) rectangulaire divisé par une diagonale oblique en bas et en dedans (Fig. 12), qui le divise en deux parties : une interne, correspondant à l'ulna (cubitus), l'autre externe, correspondant au radius. Cette diagonale est en réalité une **charnière** (Fig. 13) permettant à la partie externe, radiale, de pivoter vers l'avant de 180° et de venir se rabattre sur la partie interne, ulnaire (Fig. 14). En gros, c'est ainsi que s'effectue la pronation.

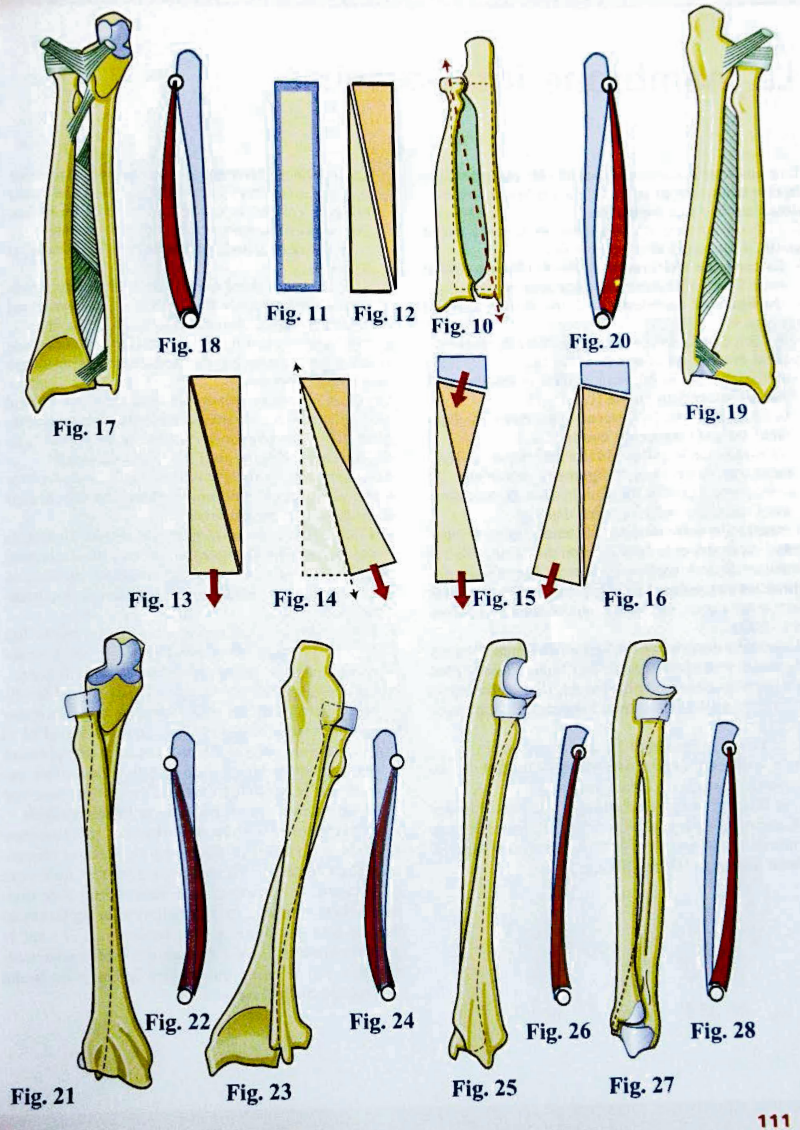
Mais une telle disposition ne rendrait pas compte du **cubitus valgus** (Fig. 36 p. 95) ; la correction des angles s'effectue au niveau de l'interligne du coude (Fig. 15) qui, nous l'avons vu, est oblique, ce qui rend la charnière verticale (Fig. 16), et rétablit le cubitus valgus (flèche rouge) en extension supination.

En position anatomique, qui correspond à la supination totale, les deux os, vus de face (Fig. 17), sont disposés côte à côte sur un même plan, parallèle l'un à l'autre. Le diagramme (Fig. 18) fait apparaître leurs courbures, légèrement exagérées. Une vue postérieure (Fig. 19) montre cette même disposition, mais inversée, avec les mêmes courbures elles aussi inverses sur le diagramme (Fig. 20). Les deux os sont réunis par la **membrane inter-osseuse**, véritable charnière souple.

Lorsque le radius tourne **en pronation** (Fig. 21), il croise l'ulna par devant, ce que montre bien le diagramme (Fig. 22). Sur une vue postérieure (Fig. 23), c'est l'inverse : l'ulna masque partiellement le radius qui n'apparaît qu'à ses deux extrémités, ce qu'on retrouve sur le diagramme (Fig. 24).

Il est important de remarquer que les deux os de l'avant-bras, en position de supination, présentent une **courbure à concavité antérieure** (Fig. 25), ce qui est nettement visible sur le diagramme des deux os vus de profil (Fig. 26). L'intérêt de cette conformation, c'est que lors de la pronation (Fig 27), l'enjambement de l'ulna par le radius, comme le montre le diagramme (Fig. 28) permet à l'extrémité inférieure du radius de se porter nettement plus en arrière, par rapport à l'ulna grâce à la correspondance face à face des deux concavités.

Cette double concavité autorise donc une plus grande amplitude de pronation, c'est pourquoi il est si important de la rétablir, spécialement sur le radius, lors de la correction des déplacements dans les fractures de deux os de l'avant-bras. Laisser persister une angulation à sommet antérieur de la diaphyse radius, c'est accepter par avance une limitation de la pronation.


Fig. 17
Fig. 18
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 10
Fig. 20
Fig. 19
Fig. 13
Fig. 14
Fig. 15
Fig. 16
Fig. 21
Fig. 22
Fig. 23
Fig. 24
Fig. 25
Fig. 26
Fig. 27
Fig. 28

La membrane inter-osseuse

La membrane interosseuse joue un **rôle essentiel** dans la coaptation des deux os de l'avant-bras entre eux, donc dans la prono-supination (Fig. 29 vue antérieure, Fig. 30 vue postérieure). Elle n'est pas le seul élément unitif: il faut aussi tenir compte de :

- La **corde de Weitbrechtt** 8, bande fibreuse tendue entre l'extrémité supérieure des deux os ;
- Du **ligament annulaire** de la radio-ulnaire supérieure 9 ;
- Renforcé par le **faisceau antérieur du ligament latéral externe du coude** (L.L.E.) 10 ;
- À distance, par le **faisceau antérieur du ligament latéral interne du coude** (L.L.I.) 11 ;
- Et en arrière, par le **faisceau postérieur du ligament latéral interne du coude** (L.L.I.) 12 ;
- Au **niveau de la radio-ulnaire inférieure**, le **ligament antérieur** 13 et le **ligament postérieur** 14, ainsi que le ligament triangulaire (non figuré) unissent l'extrémité inférieure des deux os.

La **membrane interosseuse** est étendue entre le bord interne du radius et le bord externe de l'ulna. Elle est constituée de deux nappes formées de **fibres obliques à directions croisées**. La description de ses fibres est basée, entre autres, sur les travaux récents de L. Poitevin - 2001.

- La **couche antérieure** est formée de fibres obliques en bas et en dedans à partir de l'ulna, d'autant plus obliques qu'elles sont plus basses. Dans cette nappe continue, on distingue trois faisceaux de renforcement :
  - le **faisceau proximal** 1 quasi horizontal ;
  - le **faisceau intermédiaire descendant** 2, la bande centrale de Hotchkiss ;
  - le **faisceau distal descendant** 3, le plus oblique.

  Cette nappe, par la direction de ses fibres (flèches noires et rouges), empêche la migration vers le haut du radius (flèche blanche).
- La **couche postérieure**, beaucoup moins continue, est formée de fibres d'obliquité inverse, c'est-à-dire obliques en haut et en dedans, à partir du radius, avec **deux faisceaux** nettement individualisés :
  - le **faisceau proximal ascendant** 4, constant et solide ;
  - le **faisceau distal ascendant** 5 séparé du précédent par un espace translucide 6, à travers lequel on voit les faisceaux de la nappe antérieure.

Cette nappe, par la direction de ses fibres (flèches noires et rouges), empêche la migration vers le bas du radius (flèche blanche).

Les deux faisceaux proximaux s'attachent sur le bord médial du radius au niveau d'un épaississement nettement visible, le tubercule interosseux du radius 7, situé 8,4 cm au-dessous de l'interligne du coude.

Cette **véritable charnière souple** (Fig. 31) assure l'essentiel de la liaison mécanique, aussi bien dans le sens transversal que longitudinal :

- Elle suffit à elle seule, après section des ligaments des deux radio-cubitales et même après résection des têtes ulnaire et radiale, à maintenir les deux os au contact et à empêcher la translation longitudinale du radius ;
- Elle empêche l'échappée du radius vers le bas (Fig. 32) par ses fibres postérieures. Dans cette direction, aucune butée osseuse ne vient la limiter ;
- Le déplacement vers le haut (Fig. 33) tend les fibres antérieures. Sur coude étendu, le radius transmet 60 % de la contrainte, alors qu'il en reçoit 82 % au niveau du poignet. Dans ce sens, le déplacement est finalement bloqué par la **butée de la tête radiale sur le condyle huméral**. Un traumatisme trop fort peut causer une **fracture de la tête radiale**.

Les **déchirures de la membrane interosseuse** (Fig. 34 et 35) sont rares, et le plus souvent méconnues. Les fibres antérieures ne se rompent qu'en cas de luxation de la radio-ulnaire supérieure ou de fracture de la tête radiale, car normalement le déplacement vers le haut est limité par la butée (Fig. 34) sur le condyle huméral. Après rupture des fibres postérieures (Fig. 35) le déplacement vers le bas n'est limité par aucune butée osseuse.

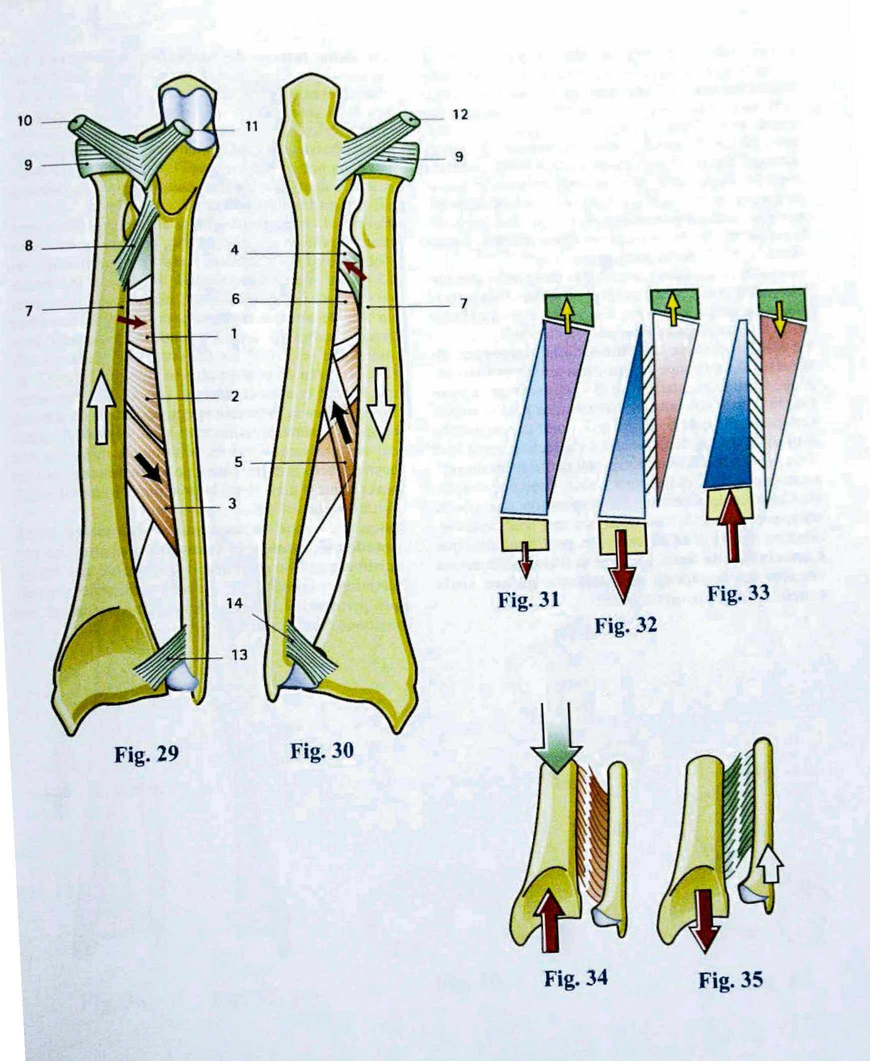


Fig. 29

Fig. 30

Fig. 31

Fig. 32

Fig. 33

Fig. 34

Fig. 35

Les contraintes en élongation du radius par rapport à l'ulna ne sont pas seulement contrecarrées par la membrane interosseuse, mais aussi par **les muscles longitudinaux** de la main et des doigts qui possèdent des insertions sur l'épitrochlée (Fig. 36) pour les fléchisseurs (*flexor digitorum communis*, *palmaris longus* et palmaris *brevis*) et sur l'épicondyle **b** pour les extenseurs (*extensor digitorum communis*, *extensor radialis longus et extensor radialis brevis*, *flexor carpi ulnaris et flexor carpi radialis*). Trois muscles du coude, le *supinator brevis*, le *pronator teres*, et le *brachioradialis* (Fig. 37) participent à cette action.

La contraction de ces muscles **lors de la prise des objets lourds, ou des contraintes en élongation sous le poids du corps**, contribue à la stabilité longitudinale du radius, ainsi qu'à la coaptation du coude.

Le **rôle mécanique des fibres de la membrane interosseuse** s'explique si l'on considère le mouvement d'une fibre élémentaire (Fig. 38) : à partir de sa position initiale **1**, son extrémité externe ne peut se déplacer que sur un cercle de centre **0**, point de son attache sur l'ulna. Que ce déplacement s s'effectue vers le haut **2** ou vers le bas **3**, il s'ensuit obligatoirement un rapprochement **n** du radius vers l'ulna, donc une coaptation transversale accrue. La disposition des fibres, obliquement dans le sens de la traction, rend cette disposition encore plus efficace. On peut donc dire que **l'association de deux couches à fibres obliques et croisées est beaucoup plus efficace qu'une seule couche à fibres transversales**.

Un **autre facteur de coaptation transversale** est constitué par l'insertion d'une partie des muscles de l'avant-bras, en particulier les fléchisseurs, sur les faces de la membrane (Fig. 39). Au repos **a**, l'écart entre les deux os est maximum. Par contre, la traction des fléchisseurs **b** tend la membrane, ce qui rapproche ses deux bords, et donc accroît la coaptation transversale des deux articulations radio-ulnaires au moment où elle est la plus nécessaire.

Enfin, si l'on considère que les efforts de rotation sont considérables : le couple de pronation est chez l'homme de 70 kg/cm, celui de supination de 85 kg/cm ; ces chiffres sont de 50 % chez la femme, on constate que la membrane interosseuse joue aussi un rôle de **butée « molle »** pour limiter la pronation grâce aux muscles de la loge antérieure. À partir de la supination (Fig. 40), les fléchisseurs insérés sur elle (Fig. 41) sont de plus en plus comprimés (Fig. 42) ce qui la tend et accroît ainsi la coaptation. L'interposition des masses musculaires empêche dans un premier temps le contact du radius sur l'ulna, capable d'entraîner une fracture. C'est en position de référence dite position zéro que les fibres de la membrane sont les plus tendues ; c'est donc la position d'immobilisation préférentielle.

Jusqu'à ce jour, la membrane interosseuse est la **grande méconnue de l'avant-bras** car elle joue certainement un rôle essentiel. Il est possible que des explorations plus sélectives grâce à l'imagerie magnétique permettent de mieux connaître dorénavant son anatomie fonctionnelle.

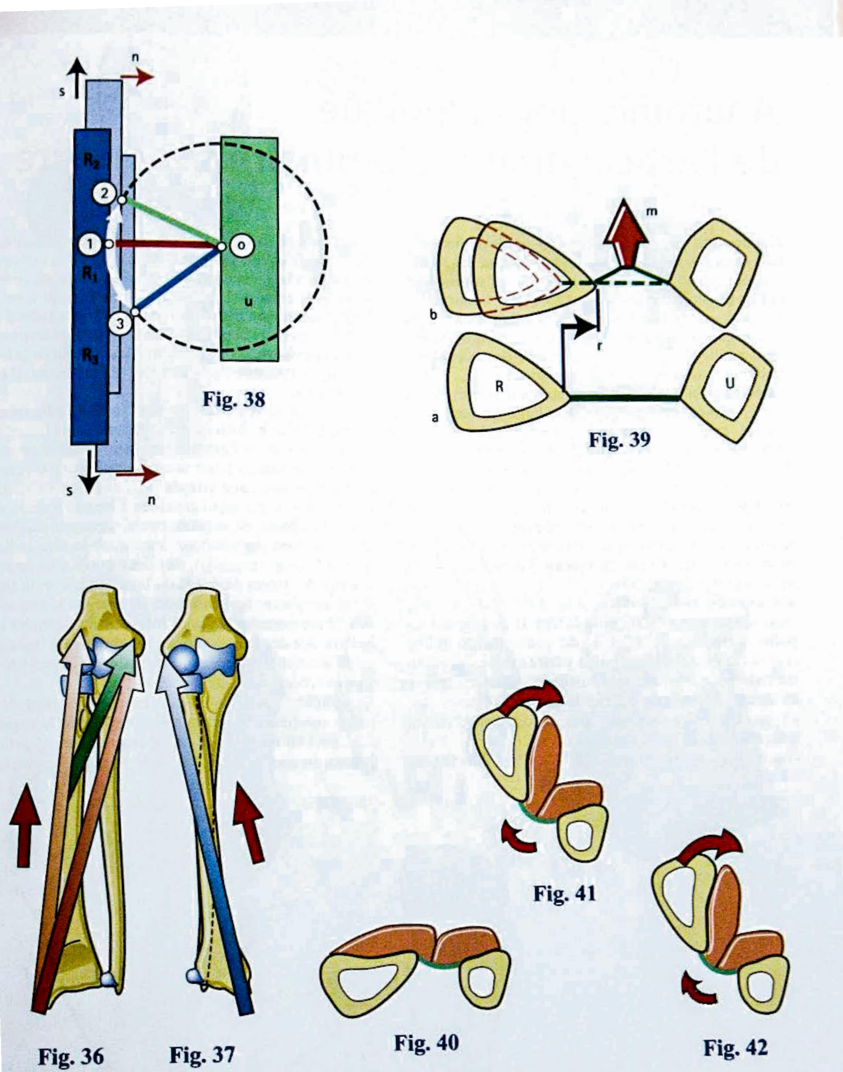


Fig. 38

Fig. 39

Fig. 36

Fig. 37

Fig. 41

Fig. 40

Fig. 42

Anatomie physiologique de l'articulation radio-ulnaire supérieure

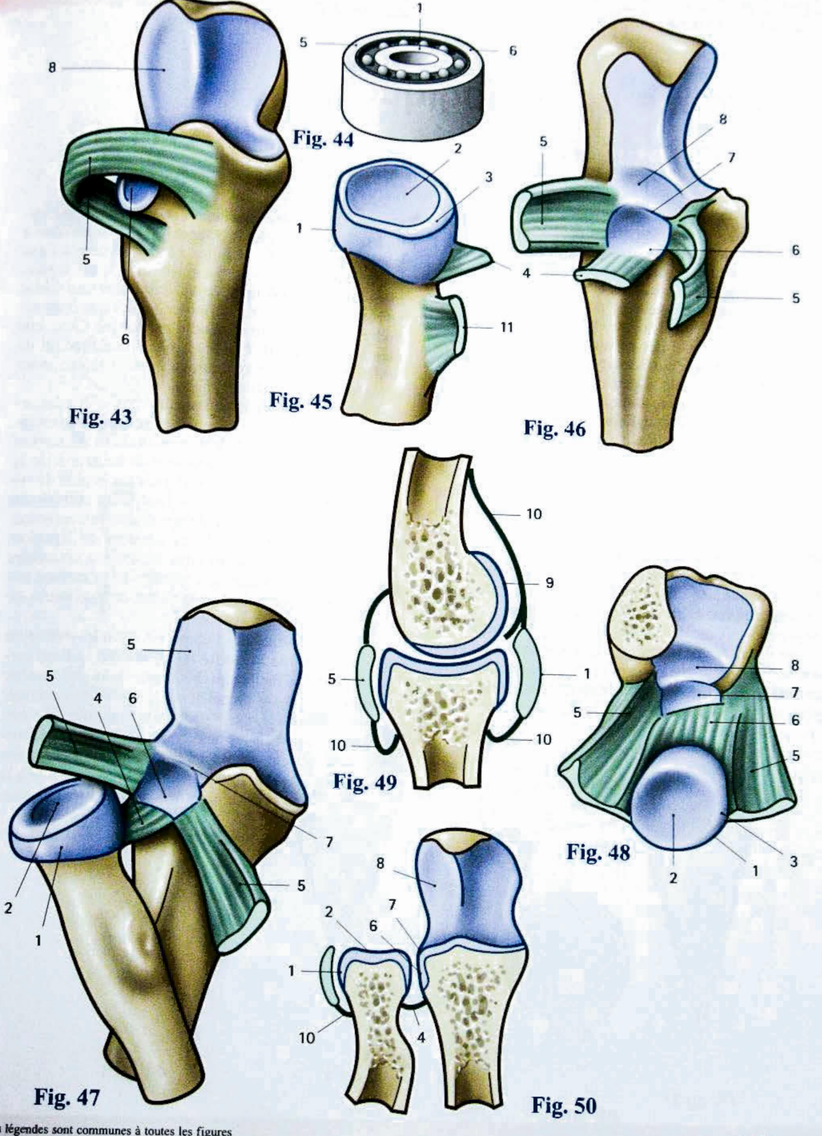
L'articulation radio-ulnaire supérieure (radio-cubitale supérieure R.C.S.) est une **trochoïde** : ses surfaces sont cylindriques et elle ne possède qu'**un seul degré de liberté** : la rotation autour de l'axe longitudinal des deux cylindres emboîtés. On peut la comparer, en mécanique, à un palier simple ou mieux, à un roulement à billes (Fig. 44). Elle comporte donc deux surfaces approximativement cylindriques.

La tête radiale (Fig. 45) avec son pourtour cylindrique **1**, recouvert de cartilage, plus large en avant et en dedans, et qui correspond au palier central **1** du roulement à billes. À sa face supérieure se situe une surface concave, calotte sphérique, la **cupule radiale 2**, qui s'articule (Fig. 49 : coupe sagittale) avec le **condyle huméral 9**. Ce condyle, ne débordant pas en arrière, la cupule n'est en contact avec lui dans l'extension que par la moitié antérieure de sa surface. Son pourtour est occupé par un **biseau** 3 dont nous avons vu la signification p. 93.

Un anneau ostéo-fibreux, (Fig. 43 d'après Testut), bien visible après ablation de la tête. Il correspond au palier périphérique **5** et **6** du roulement à billes (Fig. 44). Il est constitué par la **petite cavité sigmoïde du cubitus 6**, encroûtée de cartilage, concave d'avant en arrière, séparée de la **grande cavité 8** (Fig. 46, 47, 48) par une **crête mousse 7** antéro-postérieure, et par le **ligament annulaire 5** (intact sur les figures 43 et 49 - sectionné sur les figures 46 et 47). C'est une bandelette fibreuse fixée sur les bords antérieur et postérieur de la petite cavité sigmoïde, sa face interne, concave de haut en bas, est encroûtée d'un cartilage en continuité avec celui de la petite cavité, si bien qu'il **est à la fois un moyen d'union**, il entoure la tête radiale et l'applique contre la petite cavité sigmoïde, **et une surface articulaire**, il s'articule avec le pourtour de la tête radiale. À l'inverse de la petite cavité sigmoïde, il est déformable.

Constituant un deuxième moyen d'union, le **ligament carré de Dénucé 4** est figuré sectionné sur la figure 47 (d'après Testut : le ligament annulaire a été coupé et le radius a été basculé). Sur une vue supérieure, olécrane et ligament annulaire coupés (Fig. 48, d'après Testut) il est intact. C'est une bandelette fibreuse insérée sur le bord inférieur de la petite cavité sigmoïde de l'ulna et sur la base du pourtour interne de la tête radiale (Fig. 49 : coupe frontale). Ses deux bords sont renforcés par des fibres émanées du bord supérieur du ligament annulaire. Son insertion interne est tissée avec des fibres émanées du bord inférieur du ligament annulaire. Au-dessous de l'insertion radiale du ligament carré se situe la tubérosité bicipitale sur laquelle s'insère le tendon du *biceps brachii* **11**.

Le ligament carré représente un renforcement de la partie inférieure de la capsule ; le reste de la capsule **10** réunit en un seul ensemble anatomique les articulations du coude : ulno-humérale et radio-humérale.



Les légendes sont communes à toutes les figures

Anatomie physiologique de l'articulation radio-ulnaire inférieure

Architecture et constitution mécanique de l'extrémité inférieure du cubitus

Comme son homologue, la supérieure, l'articulation radio-ulnaire inférieure est une **trochoïde** : ses surfaces sont approximativement cylindriques et elle ne possède qu'un seul degré de liberté : rotation autour de l'axe longitudinal des deux cylindres emboîtés.

La première de ces surfaces cylindriques est supportée par la tête cubitale. L'extrémité inférieure du cubitus peut être considérée comme étant formée (Fig. 51) par la pénétration d'un cylindre diaphysaire **1** dans un cône épiphysaire **2**. Mais il faut remarquer que l'axe du cône est déjeté en dehors par rapport à celui du cylindre. Sur ce solide composite (Fig. 52), un plan horizontal **3** détache un tronc de cône (Fig. 53) ; la coupe inférieure forme la surface inférieure de la tête ulnaire **4**. Ensuite (Fig. 54), un cylindre sécant **5**, détache un croissant solide **6** et détermine ainsi (Fig. 55) la formation de la surface périphérique de la tête ulnaire **7**. Il faut remarquer que le cylindre sécant **5** n'est pas concentrique au cylindre diaphysaire **1**, ni au cône épiphysaire **2** : il est décalé en dehors. Ceci explique la forme de la surface périphérique : croissant « enroulé » sur un cylindre, avec une corne en avant et une corne en arrière, qui « encadrent » la styloïde cubitale 8 rapportée à la partie postéro-interne de l'épiphyse.

Dans la réalité, cette surface n'est pas tout à fait cylindrique : elle est plutôt conique (Fig. 56) : ce cône à sommet inférieur possède un axe **x** parallèle à l'axe diaphysaire de l'ulna **y**. Sa génératrice **h** est légèrement convexe en dehors, ce qui lui donne une forme en barillet (Fig. 57). En définitive, plutôt que d'un cylindre, il s'agit en fait d'un barillet conique. Cette surface périphérique de la tête ulnaire, vue de face et de profil présente un maximum de hauteur (h) en avant et légèrement en dehors.

La face inférieure de la tête ulnaire (Fig. 58), relativement plane, présente une surface articulaire en croissant, dite semi-lunaire dont le maximum de largeur correspond au point de maximum de hauteur **h** de la face périphérique. Ainsi sont alignés sur le plan de symétrie (flèche) : l'insertion sur la styloïde cubitale du ligament collatéral interne de la radio-carpienne (carré vert), l'insertion principale du sommet du ligament triangulaire (étoile rouge) entre la surface articulaire et la styloïde, le centre de courbure de la surface périphérique (croix noire) et le point de maximum de hauteur du pourtour articulaire.

À la face interne de l'épiphyse radiale inférieure (Fig. 59) se situe la **cavité sigmoïde du radius**, correspondant à la surface périphérique de la tête ulnaire. La surface concave de cette cavité sigmoïde est inversement conformée, par rapport à la tête ulnaire, c'est-à-dire concave dans les deux sens, contenue sur la surface d'un cône à pointe inférieure, dont l'axe x est vertical. Sa hauteur à sa partie moyenne est égale à la hauteur **h** de la surface périphérique de la tête ulnaire.

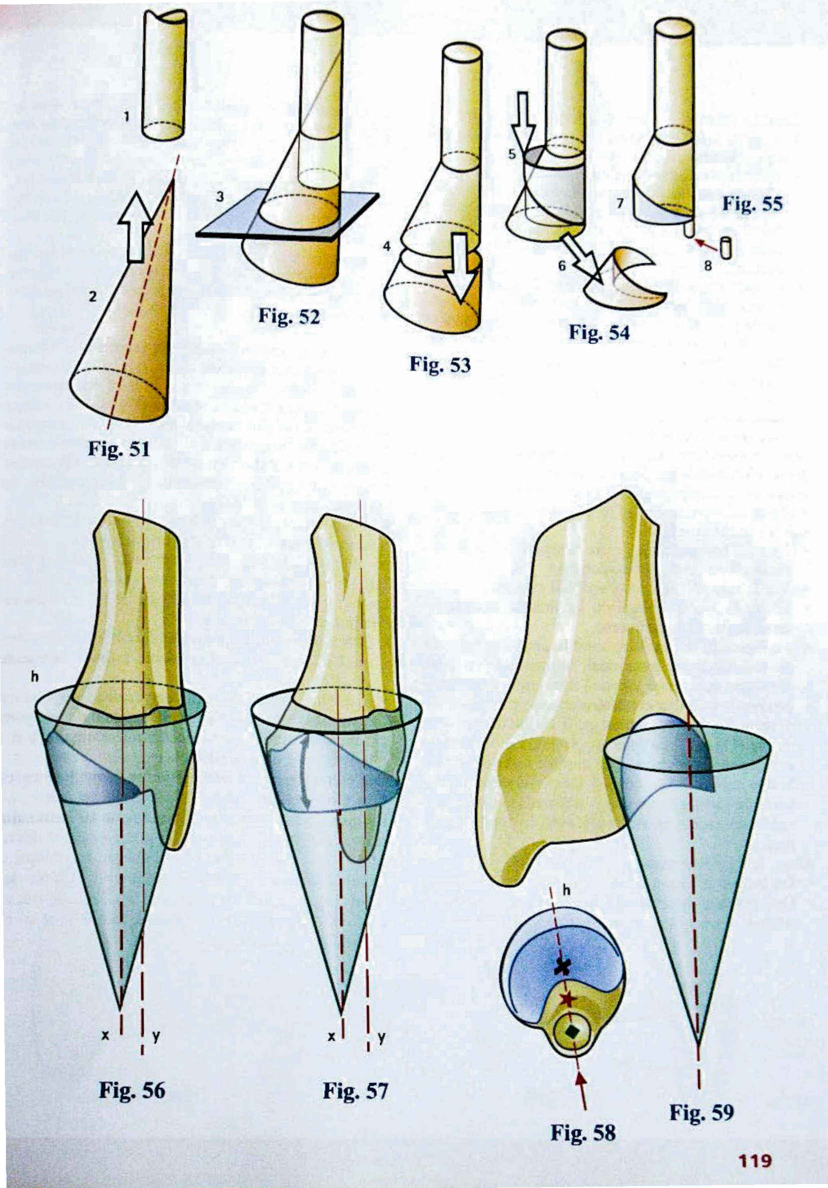


Fig. 51

Fig. 52

Fig. 53

Fig. 54

Fig. 55

Fig. 56

Fig. 57

Fig. 58

Fig. 59

Constitution de la radio-ulnaire inférieure

L'épiphyse inférieure du radius supporte **deux surfaces articulaires** (Fig. 60 et 61) :

- La **première**, située à sa face inférieure, est la **glène radiale**, avec sa fossette scaphoïdienne **8** et sa fossette lunarienne **16**. Cette glène, la plus étendue, est limitée en dehors par la styloïde radiale **1**. Nous la détaillerons à propos de l'articulation radio-carpienne ;
- La **deuxième**, la **cavité sigmoïde du radius 3**, est située entre les branches de dédoublement du bord interne **2** de l'os. Elle est orientée en dedans (Fig. 61), elle est concave d'avant en arrière, et de haut en bas. Comme nous l'avons vu précédemment, elle est inscrite sur la surface d'un cône à sommet inférieur. Elle présente son maximum de hauteur à sa partie moyenne et s'articule avec la surface périphérique **4** de la tête ulnaire.

Sur son bord inférieur s'insère le **ligament triangulaire 5** situé dans un plan horizontal (Fig. 62 : coupe frontale). Il existe souvent à l'état normal une fente **6** à la partie moyenne de son insertion radiale. Son sommet s'attache en dedans :

- Dans la fossette située entre la styloïde **9** et la surface inférieure de la tête cubitale ;
- Sur la face externe de la styloïde cubitale ;
- Et sur la face profonde du ligament collatéral interne de la radio-carpienne.
- Le ligament triangulaire comble ainsi l'espace entre tête ulnaire et pyramidal, formant un coussinet élastique, comprimé lors de l'adduction du poignet. Ses bords antérieur et postérieur sont épaissis en véritables ligaments, si bien qu'il est biconcave à la coupe (Fig. 61). Sa face supérieure, recouverte de cartilage, s'articule avec la surface inférieure **7** de la tête cubitale (Fig. 60). Sa face inférieure, recouverte de cartilage, prolonge en dedans la cavité glénoïde du radius et s'articule avec le condyle carpien.

Ainsi, le ligament triangulaire est à la fois :

- **Un moyen d'union** de la radio-cubitale inférieure ;
- **Une surface articulaire**, vers le haut : avec la tête cubitale, et vers le bas : avec le condyle carpien.

La tête cubitale ne s'articule pas directement avec le condyle carpien, car le ligament triangulaire forme une **cloison** entre l'articulation radio-ulnaire inférieure (en haut) et l'articulation radio-carpienne (en bas) (Fig. 37), qui sont ainsi anatomiquement distinctes, sauf dans les cas où le ligament triangulaire très biconcave est perforé en son centre (la perforation peut aussi être traumatique).

La petite fente **6** à sa base, considérée comme une insertion incomplète, est plus fréquente avec l'âge ce qui, pour certains, serait la preuve de son origine dégénérative.

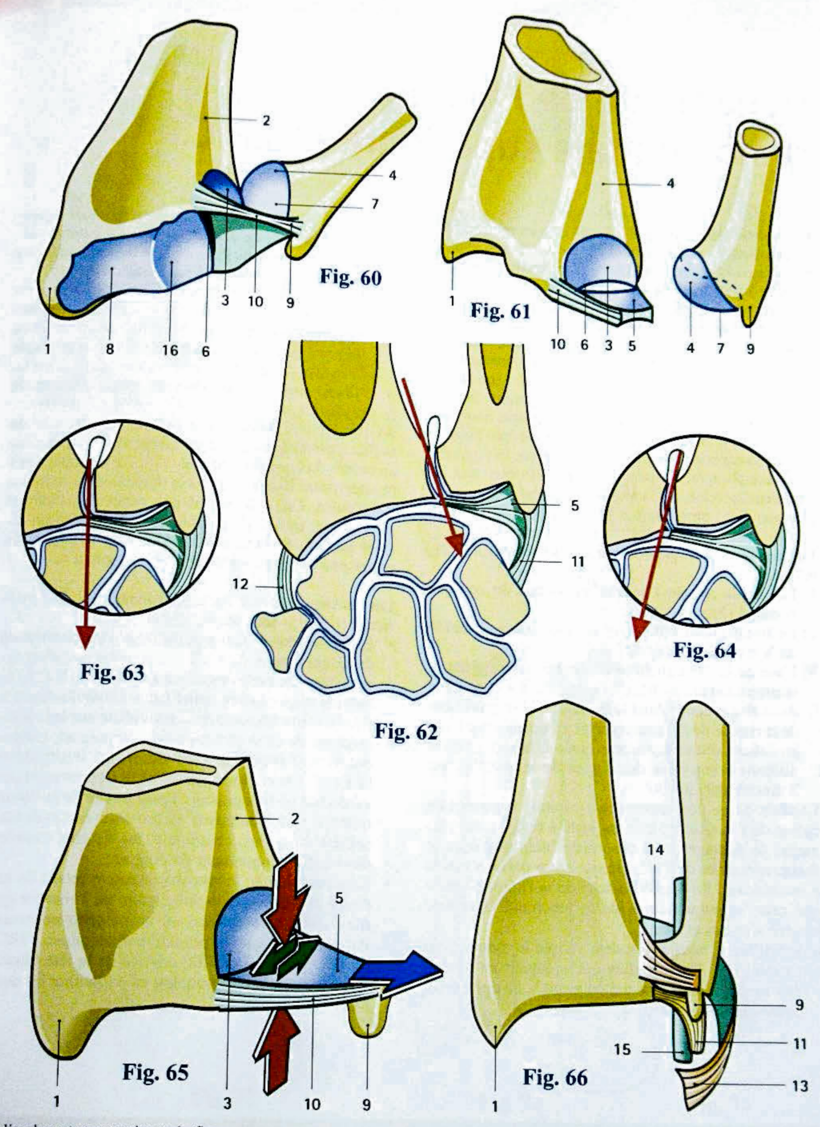
Considéré comme un « **ménisque suspendu** » il forme avec la cavité sigmoïde du radius, une cavité de réception pour la tête radiale, (Fig. 65) dont une partie est déformable. Il est ainsi soumis à d'importants efforts de **traction** (flèche horizontale bleue), de **compression** (flèches verticales rouges), et de **cisaillement** (flèches horizontales vertes) qui sont souvent combinés, ce qui explique son atteinte fréquente dans les traumatismes du poignet.

S'il constitue le principal moyen d'union de la radio-ulnaire inférieure, il n'en est pas le seul (Fig. 66). Il est aidé par le ligament antérieur **14** de la radio-ulnaire inférieure, le ligament postérieur (non visible ici) et surtout deux éléments anatomiques dont le rôle a été récemment mis en lumière :

- **L'expansion palmaire du ligament annulaire dorsal** du carpe **13**, qui contourne le bord interne du poignet ;
- **Le tendon de l'*extensor carpi ulnaris* 15**, maintenu dans une **solide gaine fibreuse** dans une gouttière située en dedans de la styloïde ulnaire, à la face postérieure de la tête.

Ces éléments constituent ce qu'on appelle le **carrefour fibro-aponévrotique interne** du poignet.

La direction de l'interligne radio-ulnaire peut varier suivant les sujets. Dans la très grande majorité des cas (Fig. 62 : coupe frontale) sa direction est oblique en bas et légèrement en dedans (flèche rouge) ; plus rarement (Fig. 63), elle est verticale ; ce n'est que très exceptionnellement (Fig. 64) qu'elle est oblique en bas et légèrement en dehors.



Les légendes sont communes à toutes les figures

Dynamique de l'articulation radio-cubitale supérieure et I.R.C.I

Le mouvement principal (Fig. 67) est un mouvement de **rotation de la tête radiale 1**, autour de son axe X, à l'intérieur de l'anneau **2** ostéo-fibreux, **ligament annulaire - petite cavité sigmoïde**.

Ce mouvement est limité (Fig. 68) par la tension du ligament carré de Dénucé **3** qui joue ainsi le rôle de frein, aussi bien en supination **A** qu'en pronation **B**.

D'autre part, la tête radiale n'est pas régulièrement cylindrique mais légèrement ovale (Fig. 69): son grand axe, oblique en avant et en dehors, mesure 28 mm contre 24 mm pour le petit axe. Ceci explique que l'anneau qui enserre la tête radiale ne puisse être osseux, rigide. Sa constitution, aux trois-quarts par le ligament annulaire, souple, lui permet de se déformer tout en contenant exactement la tête radiale, aussi bien en supination **A** qu'en pronation **B**.

Les mouvements secondaires sont au nombre de quatre:

1) La cupule radiale **1** tourne au contact du condyle huméral (Fig. 71).
2) Le biseau radial **4** (p. 92) *glisse* sous la zone conoïde de la trochlée humérale.
3) L'axe de la tête radiale se déplace en dehors lors de la pronation (Fig. 70). Ce fait est dû à « l'ovalité » de la tête radiale: dans la pronation **B** le grand axe de la cupule devient transversal, ce qui déplace l'axe en dehors d'une distance **e** égale à la moitié de la différence entre les deux axes de la cupule, soit 2 mm en position **X'**.

L'intérêt de ce déplacement est capital: il permet au radius de s'écarter du cubitus juste à temps pour permettre le passage de la tubérosité bicipitale dans la fosse supinatrice de l'ulna (le *supinator brevis* s'insère à son niveau). La flèche blanche de la figure 67 indique cette « insinuation » de la tubérosité bicipitale « entre » radius et ulna.

4) Par ailleurs, nous avons déjà vu que lors de la pronation (Fig. 72), le radius qui se situait en dehors de l'ulna **a** le surcroise par en avant **b**, ce qui a deux conséquences:
   - d'une part, l'axe de l'avant-bras qui était légèrement oblique en dehors, du fait du *cubitus valgus*, s'aligne dans l'axe du bras **b**, ce qui entraîne aussi l'alignement de l'axe de la main;
   - d'autre part, l'axe du radius devient oblique en bas et en dedans, si bien que le plan de la face supérieure de la tête radiale s'incline en bas et en dehors, dans la pronation (Fig. 73, b) d'un angle y égal à l'angle d'inclinaison du radius, d'où un changement d'orientation du plan de la cupule radiale.

Le changement de direction de l'axe diaphysaire du radius s'effectue autour d'un centre de rotation situé au centre du condyle huméral (Fig. 74); il vient alors se superposer (ligne rouge) à la diagonale du cadre radio-ulnaire. Or, chacun sait que cette diagonale est plus longue que le grand côté du rectangle. Il en résulte que **lors de la pronation le radius devient plus court par rapport à l'ulna** d'une longueur **r**.

Les conséquences sur l'articulation radio-ulnaire inférieure (Fig. 75) sont **importantes**:

- En **supination a**, le radius dépasse la face inférieure de la tête ulnaire de 1,5 à 2 mm: c'est ce qu'on appelle **l'index radio-cubitale inférieur** (I.R.C.I.) et que les anglophones appellent « *Ulnar Variance* » (U.V.). Cette disposition, bien visible sur les radiographies de face en supination du poignet, correspond à l'épaisseur du ligament triangulaire (T.F.C.C. des anglophones). Cet IRCI peut subir des variations pathologiques: il peut passer de sa valeur normale –2 à 0 ou même +2 (ou plus) en cas de tassement du radius, ce qui entraîne de gros troubles dans le fonctionnement du poignet;
- En **pronation b**, le raccourcissement relatif du radius **r** fait dépasser la tête ulnaire de 2 mm, ce qui n'a aucune conséquence sur les poignets normaux. Par contre, si sur un poignet pathologique, l'IRCI est déjà positif, la saillie relative de la tête ulnaire viendra aggraver les troubles, en particulier les douleurs.

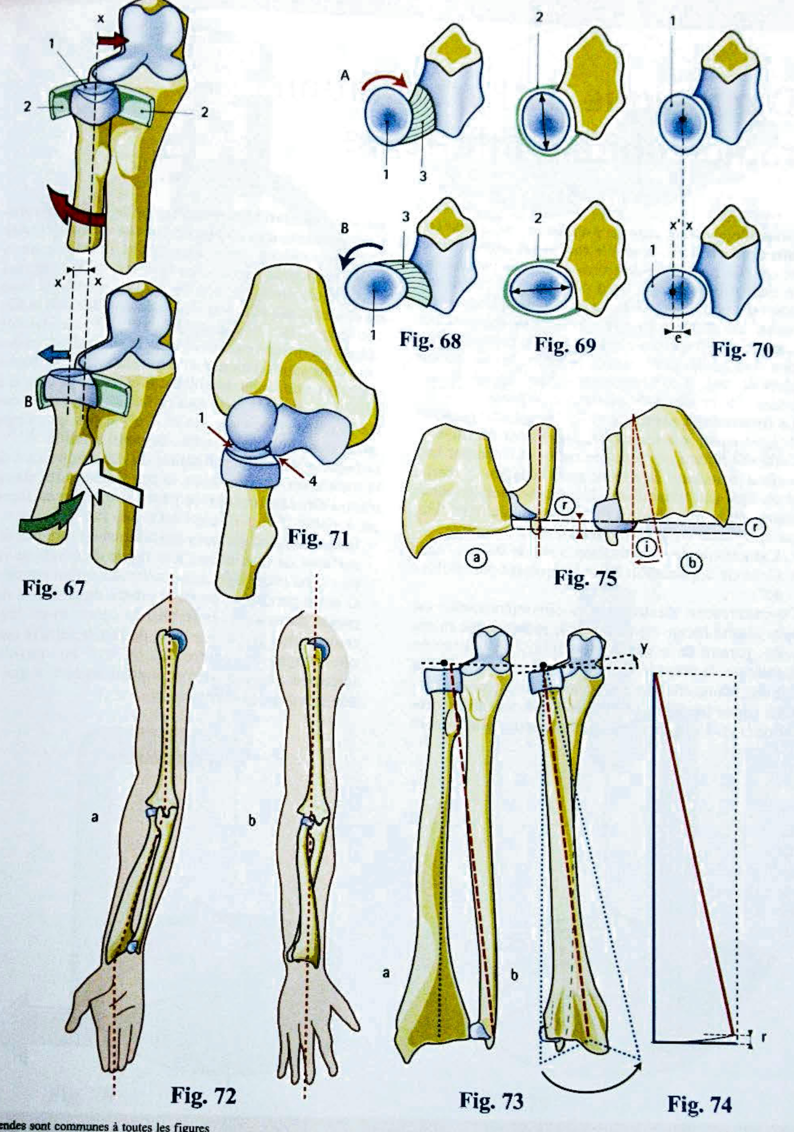


Fig. 67

Fig. 68

Fig. 69

Fig. 70

Fig. 71

Fig. 72

Fig. 73

Fig. 74

Fig. 75

Les légendes sont communes à toutes les figures

Dynamique de l'articulation radio-cubitale inférieure

Nous supposerons, dans un premier temps, que **le cubitus reste fixe** et que seul **le radius est mobile**. Dans ce cas (Fig. 76), l'axe de prono-supination passe, dans la main, au niveau du bord cubital et du cinquième doigt (l'axe est marqué d'une croix noire). Cette éventualité est réalisée lorsque l'avant-bras reposant sur une table, exécute des mouvements de prono-supination sans quitter le contact de la table : le pouce vient alors au contact de la table par sa face dorsale en supination **S**, et par sa face palmaire en pronation **P**.

Le mouvement principal (Fig. 77) est une **rotation** de l'extrémité inférieure du radius autour du cubitus. Cette vue inférieure montre le radius et l'ulna par leur surface articulaire inférieure après ablation du carpe et du ligament triangulaire. L'épiphyse radiale tourne autour de la tête ulnaire, supposée circulaire et fixe, car la styloïde cubitale (en jaune) reste immobile :

- L'amplitude de la supination S est de 90° ;
- Celle de la pronation P est légèrement plus faible : 85°.

Ce mouvement de translation circonférencielle est bien illustré lorsqu'on compare le radius à une manivelle : partant de la **supination** (Fig. 78), la branche supérieure, la poignée de la manivelle représentant la tête du radius, effectue une rotation sur l'axe longitudinal (ligne rouge en tirets), alors que lors de la pronation (Fig. 76) le mouvement de la branche inférieure est une **translation circonférencielle**, à savoir **rotation combinée à un déplacement sur une trajectoire circulaire** (flèche rose). La branche inférieure de la manivelle tourne autour d'un cylindre, qui correspond à la tête ulnaire et sa rotation sur elle-même est mise en évidence par le changement de direction de la flèche rouge (Fig. 78) vers la bleue (Fig. 79) : la styloïde radiale est dirigée en dehors dans la supination, en dedans dans sa pronation. Cette translation circonférencielle est tout à fait semblable à celle de la lune qui tourne autour de la terre tout en restant toujours orientée la même face vers elle et il n'y a pas longtemps qu'on connaît la face cachée de notre satellite.

Lorsque le radius tourne autour du cubitus, passant de la supination à la pronation, la congruence articulaire, c'est-à-dire la concordance géométrique des surfaces, est variable (Fig. 80). Ceci est dû au fait que :

- D'une part, les surfaces articulaires ne sont pas des surfaces de révolution ; leur rayon de courbure varie : il est plus court aux extrémités qu'au centre ;
- D'autre part, le rayon de courbure de la cavité sigmoïde du radius (cercle bleu de centre **r**) est légèrement plus grand que celui de la tête ulnaire (cercle rouge de centre **u**). C'est en position intermédiaire, dite encore « position zéro » que la congruence est maximum.

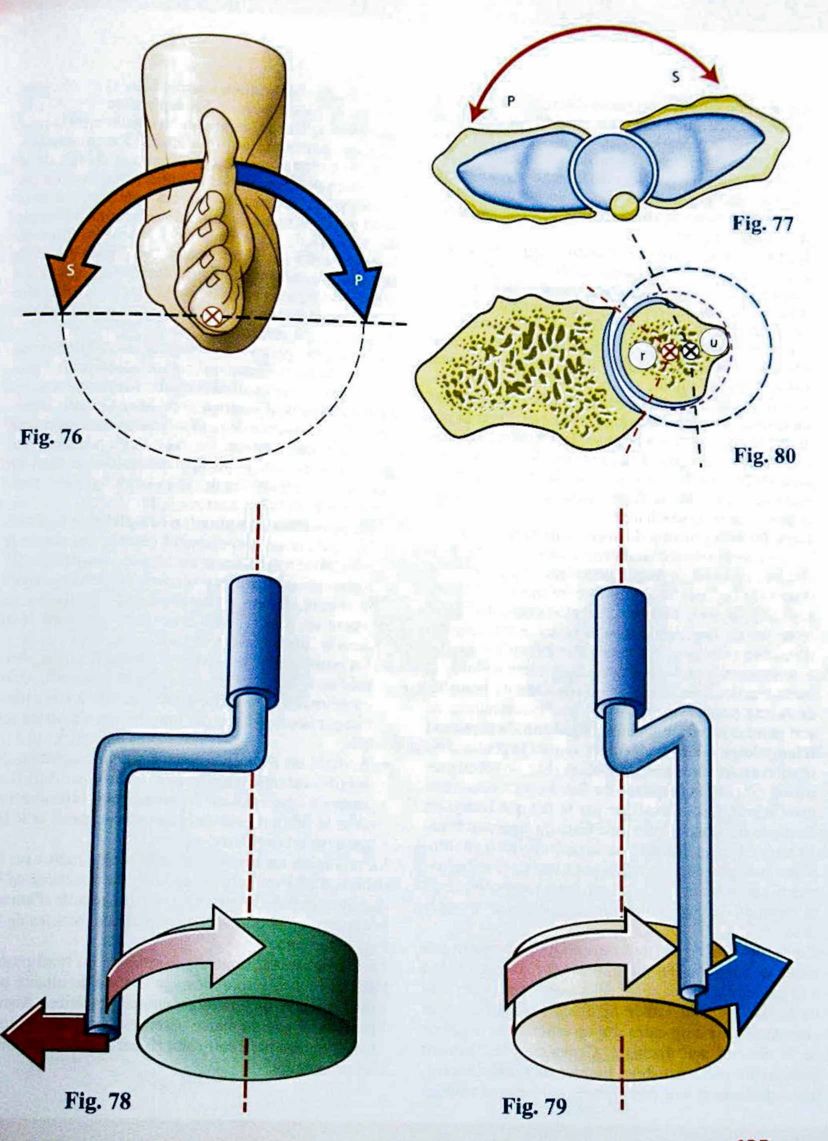


Fig. 76

Fig. 77

Fig. 80

Fig. 78

Fig. 79

Ce n'est qu'en **position intermédiaire** (Fig. 81) que la congruence articulaire est maximum. La supination (Fig. 82) et la pronation (Fig. 83) sont donc des positions d'incongruence relative dans lesquelles la tête cubitale n'entre en contact avec la cavité sigmoïde que par une partie plus faible de sa surface ; en même temps, les rayons de courbure sont peu concordants - d'où faible congruence.

En **pronation maximum**, il existe une véritable subluxation postérieure de la tête ulnaire (Fig. 88). Elle a tendance à « échapper » dorsalement (flèche noire), n'étant que peu maintenue par le ligament radio-ulnaire postérieur (en vert) ; l'élément stabilisateur essentiel est constitué par le **tendon de l'*extensor carpi ulnaris*** **e.c.u** qui, maintenu dans sa gouttière par une **gaine fibreuse** solide, « ramène » la tête vers la cavité sigmoïde du radius (flèche blanche) ; le ***pronator quadratus*** **p. q** a un rôle actif identique. Dans la position de congruence maximum, le maximum de hauteur de la surface périphérique coïncide avec le maximum de hauteur de la cavité sigmoïde, d'où un contact maximum entre les surfaces, tandis que les rayons de courbure sont concordants.

Lors des mouvements de prono-supination (Fig. 85, 86, 87), le ligament triangulaire « balaye » la face inférieure de la tête cubitale littéralement à la manière d'un essuie-glace. Sur cette face inférieure (Fig. 84), sont alignés **trois points** sur le plus grand diamètre : le centre de la styloïde ulnaire (carré vert), le point d'insertion du ligament triangulaire (étoile rouge) à son sommet, dans la fossette située entre styloïde et surface articulaire, et centre de courbure du pourtour de la tête (croix noire). Du fait de l'excentrement de son point d'insertion ulnaire, la **tension du ligament triangulaire varie** notablement suivant la position : la tension est minimum en supination (Fig. 86) et en pronation (Fig. 87) complètes du fait d'un raccourcissement relatif. Ceci s'explique par le fait que lorsqu'un diamètre du grand cercle (une fibre du ligament triangulaire) « balaye » la surface du petit cercle, il se comporte comme une sécante du petit cercle dont la longueur varie suivant sa position : ceci rend compte de la variation de tension des fibres du ligament triangulaire.

Par conséquent, la **tension est maximum pour la position de congruence maximum,** celle qui correspond à la hauteur la plus grande de la surface périphérique de la tête cubitale, car le ligament parcourt alors le chemin le plus long entre son insertion et le pourtour de la tête sur son diamètre. Cependant, le ligament triangulaire comporte **deux bandes de renforcement**, une antérieure et une postérieure, qui ne sont tendues également qu'en position intermédiaire (Fig. 85), leur tension est alors moyenne. **En supination** (Fig. 87), la bandelette antérieure est tendue au maximum et la postérieure détendue au minimum. **En pronation** (Fig. 86), c'est l'inverse qui se produit du fait de la différence de longueur des chemins parcourus par ces faisceaux ligamentaires. Sur ces schémas, on peut aussi remarquer que, du fait de la répartition différente des tensions, la petite fente de la base d'insertion du ligament subit des déformations. Il en est de même de la déhiscence centrale, qui peut être physiologique, ou d'une perforation centrale traumatique ; cette dernière aura donc tendance à s'aggraver avec les mouvements de prono-supination.

On peut donc parler d'une position de stabilité maximum de la radio-ulnaire inférieure, répondant en gros à la position intermédiaire de prono-supination. C'est la « ***close-packed position*** » de Mac Conaill : maximum de congruence des surfaces associé au maximum de tension ligamentaire. Ici, il ne s'agit pas d'une position de verrouillage puisque intermédiaire, mais on peut noter la répartition des rôles entre ligament triangulaire et membrane interosseuse :

- **En pronation et supination complètes**, le ligament triangulaire est partiellement détendu par contre la membrane interosseuse est tendue. À noter que les ligaments antérieur et postérieur de la radio-ulnaire inférieure, faibles épaississements capsulaires, ne jouent un rôle ni dans la coaptation articulaire ni dans la limitation des mouvements ;
- **En position de stabilité maximum**, position intermédiaire, le ligament triangulaire est tendu et la membrane interosseuse détendue, sauf à être retendue par la contraction des muscles qui s'insèrent sur elle.
- Au total on peut donc retenir que la coaptation de la radio-cubitale inférieure est assurée par deux formations anatomiques : la **membrane interosseuse** dont le rôle est essentiel mais sous-estimé, et **le ligament triangulaire**.

La pronation est limitée par la butée du radius sur le cubitus d'où l'importance de la légère concavité de la diaphyse radiale vers l'avant, ce qui retarde d'autant le contact, ainsi que l'interposition des muscles de la loge antérieure.

La supination est limitée par la butée du bord postérieur de la cavité sigmoïde sur la styloïde ulnaire par l'intermédiaire du tendon du cubital postérieur. Aucun ligament, ni aucune butée osseuse n'arrêtent ce mouvement qui est par contre amorti par le tonus des muscles pronateurs.

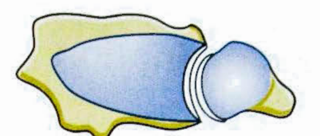


Fig. 81

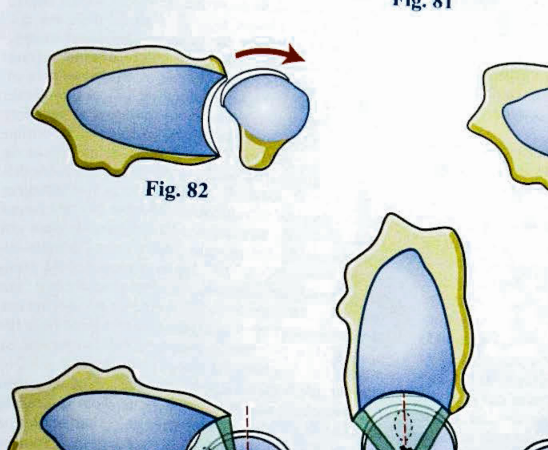


Fig. 82

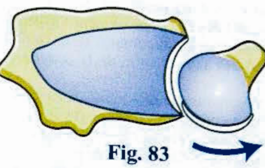


Fig. 83

Fig. 87

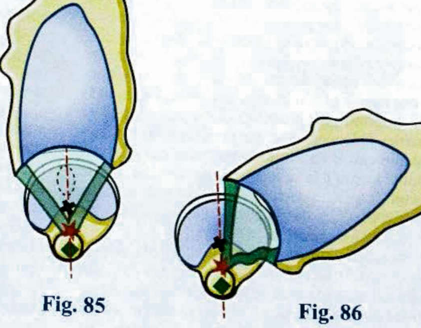
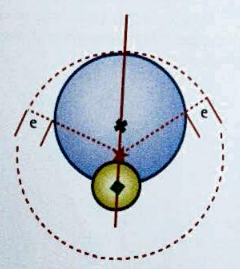


Fig. 85

Fig. 86



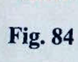


Fig. 84

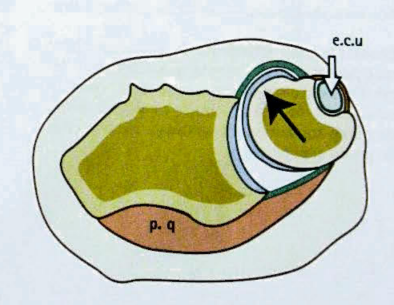


Fig. 88

L'axe de prono-supination

Jusqu'à maintenant nous avons envisagé isolément la physiologie de la radio-ulnaire inférieure, mais il est facile de comprendre qu'il existe un **couplage fonctionnel entre les deux radio-ulnaires** : elles sont **mécaniquement liées** car l'une ne peut fonctionner sans l'autre. Ce couplage fonctionnel se situe à deux niveaux, celui des axes et celui de la congruence (voir plus loin).

Les deux articulations radio-cubitales sont **co-axiales**, leur fonctionnement normal nécessite impérativement que l'axe de l'une soit dans le prolongement de l'axe de l'autre (Fig. 89) sur une même droite XX' qui constitue la charnière de prono-supination et passe par le centre des têtes ulnaire et radiale. Pour prendre un exemple imagé, une porte (Fig. 90) ne peut s'ouvrir facilement que si les axes de ses deux charnières sont parfaitement alignés **a**, c'est-à-dire dans le prolongement l'un de l'autre. Si, par une malfaçon impardonnable, ces axes **1** et **2** n'étaient pas concordants **b**, la porte ne pourrait plus s'ouvrir, sauf à être coupée en deux parties indépendantes, qui pourraient alors s'ouvrir séparément. Il en est de même pour ces deux articulations : lorsqu'à la suite d'une fracture mal réduite intéressant l'un ou les deux os de l'avant-bras les deux axes ne sont plus alignés : la **perte de co-axialité** compromet la prono-supination.

Si l'on considère le mouvement du radius par rapport à l'ulna (Fig. 89), autour de l'axe commun **XX'** des articulations radio-ulnaires, le radius se déplace sur un segment de surface conique **C**, ouvert en arrière, à base inférieure et dont le sommet se situe au niveau de l'articulation condylo-radiale, au centre du condyle huméral.

En supposant la tête cubitale fixe, la prono-supination s'effectue par rotation de l'épiphyse radiale inférieure autour de l'axe de la radio-ulnaire inférieure, commun avec celui de la supérieure. Dans cette éventualité, l'axe de prono-supination est confondu avec la charnière de prono-supination.

Si la prono-supination s'effectue autour d'un axe passant par la colonne du pouce, le radius tourne autour de la styloïde radiale (Fig. 91) autour d'un axe qui n'est pas la charnière de prono-supination, et l'extrémité inférieure de l'ulna subit une translation suivant un demi-cercle la portant en bas et en dehors puis en haut et en dehors tout en restant parallèle à elle-même. La composante verticale de ce mouvement peut fort bien être expliquée par un mouvement d'extension puis de flexion dans l'huméro-ulnaire, au niveau du coude. Quant au déplacement en dehors, il semble difficile, vu son amplitude de près de deux fois la largeur du poignet de l'expliquer, comme on le faisait jusqu'alors, par un mouvement de latéralité dans une articulation trochléenne aussi serrée que l'huméro-cubitale. Récemment, M.C. Djbay a proposé une explication mécanique plus satisfaisante pour l'esprit : une rotation externe associée de l'humérus sur son axe longitudinal entraînerait le déplacement externe de la tête ulnaire (Fig. 92) tandis que le radius tourne sur lui-même (Fig. 93) autour d'un centre de rotation (Fig. 94) situé en plein dans l'épiphyse radiale. Une telle théorie, supposant une rotation externe dans la scapulo-thoracique, pourrait être vérifiée en recueillant les potentiels d'action des muscles rotateurs de l'humérus au cours des mouvements de prono-supination.

Il faut remarquer que le changement d'orientation du radius devrait entraîner (Fig. 95) une inclinaison de l'axe de la main vers l'intérieur (flèche rouge). Cependant, du fait du *cubitus valgus* physiologique (Fig. 96) l'axe articulaire du coude est légèrement oblique en bas et en dedans, si bien que la charnière de prono-supination devient longitudinale. La pronation du radius ramène alors l'axe de la main exactement dans le sens longitudinal (flèche noire).

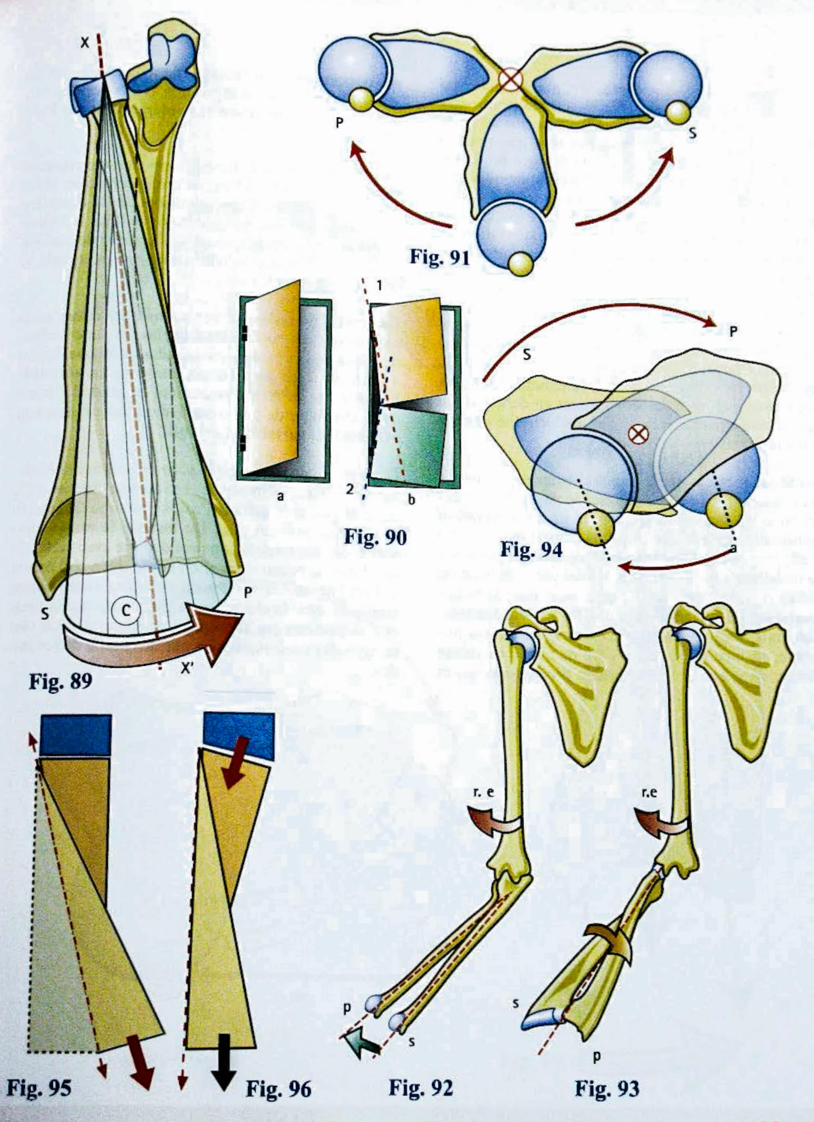


Fig. 89
Fig. 91
Fig. 90
Fig. 94
Fig. 95
Fig. 96
Fig. 92
Fig. 93

Si cette hypothèse était confirmée, par des radiographies précises ou des enregistrements électromyographiques, cette rotation externe de l'humérus serait de l'ordre de 5 à 20° et n'interviendrait que pour la prono-supination sur coude fléchi à angle droit. Sur coude complètement étendu, l'ulna est immobilisé par encastrement de l'olécrane dans sa fossette et si l'on immobilise très étroitement le coude on s'aperçoit que la pronation est quasi nulle alors que la supination est conservée en totalité. La suppléance de la pronation perdue s'effectue par rotation interne de l'humérus. Au cours de l'extension du coude, il existerait donc un « point de transition » pour lequel la rotation associée de l'humérus deviendrait nulle. Que dire aussi de la limitation de la pronation à 45° sur le coude complètement fléchi ? L'humérus semble alors dans l'impossibilité de tourner sur son axe longitudinal et il faut bien alors expliquer le déplacement en dehors de la tête cubitale par un mouvement de latéralité externe dans la trochléenne du coude.

Entre les deux cas extrêmes précédemment envisagés où l'axe de prono-supination passe par le bord cubital ou le bord radial du poignet, **la prono-supination habituelle centrée sur la prise tridigitale** (Fig. 97) s'effectue autour d'un axe intermédiaire qui passe par le **troisième rayon**, à travers l'épiphyse inférieure du radius (Fig. 98) près de la cavité sigmoïde : le radius tourne sur lui-même de près de 180° - c'est une rotation vraie - et l'ulna se déplace, sans rotation sur lui-même, sur une trajectoire en arc de cercle de même centre, intégrant une composante d'extension **ext** et une composante de latéralité externe **lat**. Le centre de la tête ulnaire passe de la position **O** à la position **O'** décrivant une **translation circonférencielle** sur l'arc **OO'**.

La prono-supination devient alors un **mouvement complexe** (Fig. 99) où l'axe de prono-supination **ZZ'**, non matérialisé, est tout à fait distinct de la charnière de prono-supination, qui, entraînée de l'axe **X** à l'axe **Y** par la tête cubitale décrit un segment de surface conique (non dessiné) dont la concavité « regarde », cette fois-ci, vers l'avant.

Au total il n'existe pas une prono-supination mais bien des prono-supinations, la plus courante s'effectuant sur un axe passant par le radius et autour duquel « tournent » les deux os, comme dans un **véritable ballet**. *L'axe* de prono-supination, en général distinct de la charnière de prono-supination, est un **axe non matérialisé, variable et évolutif**.

Que cet axe de prono-supination ne soit ni matérialisable ni fixe, n'implique en aucune façon qu'il n'existe pas, à ce compte l'axe de rotation de la terre n'existerait pas non plus. Du fait que la prono-supination est une rotation, on peut déduire avec certitude que l'axe de prono-supination existe, bien réel même s'il est immatériel, qu'il n'est qu'exceptionnellement confondu avec la charnière de prono-supination mais que sa position par rapport au squelette dépend tant du type de prono-supination que de chacun de ses stades.

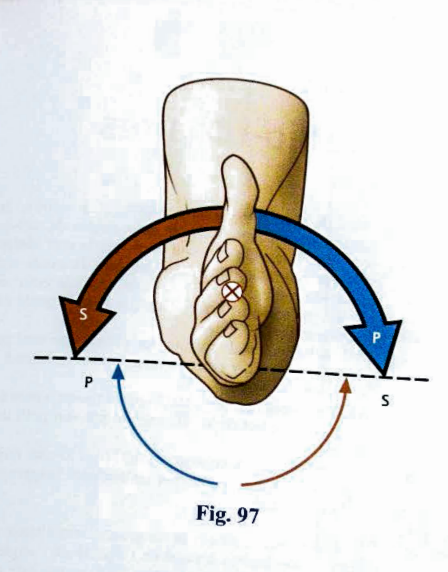


Fig. 97

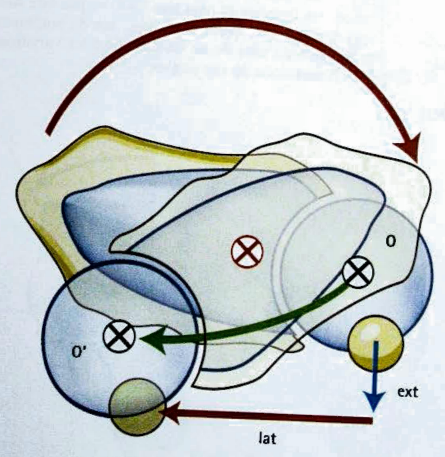


Fig. 98

Fig. 99

La congruence simultanée des deux articulations radio-ulnaires

Le couplage fonctionnel des radio-ulnaires est souligné en outre par leur congruence simultanée : la position de stabilité maximum de la radio-ulnaire supérieure et celle de la radio-ulnaire inférieure sont réalisées pour la même position de prono-supination (Fig. 100). Autrement dit, lorsque la tête ulnaire (Fig. 101) présente son maximum de hauteur h dans la cavité sigmoïde du radius, le pourtour de la tête radiale (Fig. 102) présente aussi son maximum de hauteur **i** dans la petite cavité sigmoïde de l'ulna.

Le plan de symétrie (Fig. 100) de la cavité sigmoïde du radius **s** et celui de la tête radiale **t**, passant par le point de la plus grande hauteur du pourtour, forment un angle dièdre ouvert en dedans et en avant (flèche rouge) ou **angle de torsion du radius** qui est égal à **l'angle de torsion du cubitus** déterminé de la même façon par le plan de symétrie de la tête ulnaire (passant par le point de plus grande hauteur du pourtour) et celui de la petite cavité sigmoïde de l'ulna.

Cet angle cependant peut être variable suivant les sujets. Il suffit pour s'en convaincre de regarder un cubitus « en fuite » par son extrémité inférieure.

Dans la position intermédiaire (Fig. 103), la congruence est parfaite si les deux angles de torsion sont identiques. On constate alors que la tête ulnaire présente son plus grand diamètre dans la cavité sigmoïde du radius, tandis que la tête radiale entre en contact par son plus grand diamètre avec la petite cavité sigmoïde de l'ulna.

Mais si les angles de torsion des deux os ne sont pas identiques, il peut y avoir un retard ou une avance à la pronation.

Ainsi, en pronation (Fig. 104), une « avance » peut entraîner un contact de la tête radiale par son petit diamètre.

De la même façon, en supination (Fig. 105), un retard peut entraîner un contact par un segment inapproprié de la tête radiale.

On doit donc retenir que la congruence simultanée des deux radio-ulnaires dépend de l'égalité de l'angle de torsion des deux os et peut très bien ne pas être toujours réalisée. Une étude statistique sur de nombreux cas permettrait sans doute de connaître les variations et les répartitions de ces angles.

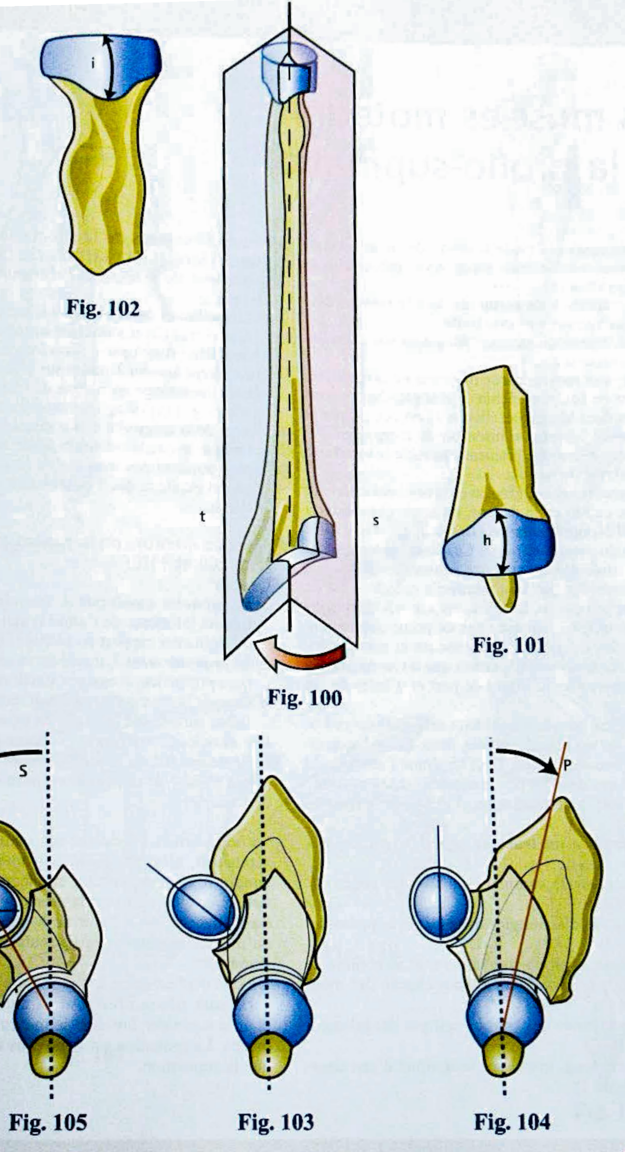


Fig. 102

Fig. 100

Fig. 101

Fig. 105

Fig. 103

Fig. 104

Les muscles moteurs de la prono-supination

Pour comprendre le mode d'action des muscles moteurs, il faut considérer du point de vue mécanique, la forme du radius (Fig. 106).

Cet os comporte **trois segments** dont la réunion dessine grossièrement une **manivelle m**:

1) **Le col**, segment supérieur oblique en bas et en dedans, forme avec;
2) Le segment moyen, partie moyenne de la diaphyse, oblique en bas et en dehors, un angle obtus ouvert dehors, dont le sommet (flèche **1**) est occupé par la **tubérosité bicipitale**, insertion du *biceps brachii*. Ces deux segments dessinent ensemble la **courbure supinatrice** du radius;
3) Le segment moyen forme, avec le segment inférieur, oblique en bas et en dedans, un angle obtus ouvert en dedans dont le sommet (flèche **2**) est le lieu d'insertion du *pronator teres* **3**. Ces deux segments dessinent ensemble la **courbure pronatrice** du radius.

Il faut remarquer que la « manivelle radiale » est de travers sur son axe **m**. En effet, cet axe XX' (tirets interrompus rouges), qui est l'axe de prono-supination, passe par les extrémités des branches et non par les branches elles-mêmes. Il s'ensuit que les sommets des deux courbures se disposent de part et d'autre de cet axe.

L'axe XX' est commun aux deux articulations radio-cubitales, cette coïncidence des deux est indispensable à la prono-supination. Ceci implique l'absence de rupture de ces deux os pris ensemble ou séparément.

Pour mouvoir cette manivelle, il existe deux moyens (Fig. 107):

1) Soit **dérouler un tracteur** enroulé sur l'une des branches (flèche **1**);
2) Soit **tirer sur le sommet** de l'une des courbures (flèche **2**).

Tel est le mode d'action des muscles de la prono-supination.

Les muscles de la prono-supination sont au nombre de **quatre**, associés deux à deux. Pour chacun des mouvements, il y a:

1) Un muscle court et plat, qui agit par déroulement (flèche **1**);
2) Un muscle long, inséré sur le sommet d'une courbure (flèche **2**).

Muscles moteurs de la supination (Fig. 108: vue de face et 111 et 112: coupes du côté droit, vue du fragment inférieur par en haut)

Ce sont:

1) Le ***supinator brevis*** 1, enroulé autour du col du radius (Fig. 110) et s'insérant sur la fosse supinatrice de l'ulna: il agit par « déroulement ».
2) Le ***biceps brachii*** 2, inséré sur le sommet de la courbure supinatrice au niveau de la tubérosité bicipitale (Fig. 111): il agit par traction sur l'angle supérieur de la manivelle et son efficacité est maximum lorsque le coude est fléchi à 90°. Ce muscle est le plus puissant des muscles de la prono-supination, ce qui explique que l'**on visse en supinant**, coude fléchi.

Muscles moteurs de la pronation (Fig. 109 et 110)

Ce sont:

1) Le ***pronator quadratus* 4**, enroulé autour de l'extrémité inférieure de l'ulna: il agit par déroulement de l'ulna par rapport au radius (Fig. 109).
2) Le ***pronator teres* 3**, inséré sur le sommet de la courbure pronatrice, il agit par traction sur l'angle inférieur de la manivelle, mais son moment d'action est faible surtout sur le coude en extension.

Les muscles pronateurs sont moins puissants que les supinateurs: lorsqu'on doit dévisser une vis bloquée, il faut s'aider de la pronation fournie par l'abduction de l'épaule.

Le *brachioradialis*, malgré son nom français de long supinateur, n'est pas supinateur mais **fléchisseur du coude**. Il n'est supinateur, et encore jusqu'à la position zéro, qu'à partir de la pronation complète. Paradoxalement, c'est à partir de la supination complète, qu'il devient pronateur mais seulement jusqu'à la position zéro.

Un seul nerf est dédié à la pronation: le médian. Deux nerfs sont nécessaires pour la supination: le radial pour le *supinator brevis* et le musculo-cutané, pour le biceps. La pronation est donc plus facilement perdue que la supination.

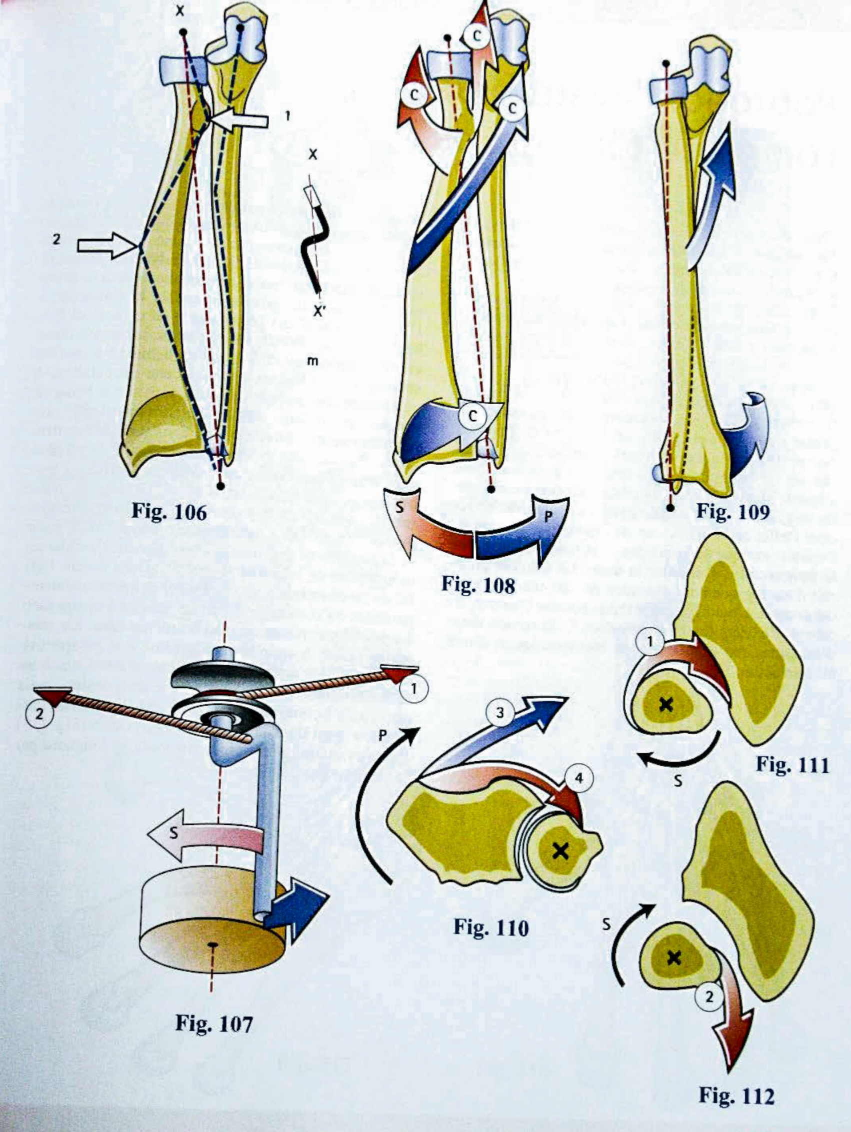


Fig. 106

Fig. 108

Fig. 109

Fig. 107

Fig. 110

Fig. 111

Fig. 112

Pourquoi l'avant-bras comporte-t-il deux os ?

Chez tous les vertébrés terrestres, le squelette de l'avant-bras, et aussi de la jambe, comporte deux os. C'est une évidence mais bien peu d'anatomistes se sont posé la question : pourquoi deux os ?
Pour essayer de donner une explication logique, il faut faire un **raisonnement par l'absurde**, imaginer un avant-bras en biomécanique-fiction : comment la main pourrait effectuer toutes ses actions si l'avant-bras ne comportait qu'un seul os, un **CubRadius** ?
Pour saisir les objets, la main doit pouvoir se présenter dans des attitudes nombreuses et variées, ce qui implique que la chaîne articulaire, à partir de l'épaule, comporte **sept degrés de liberté** : pas un de plus, mais pas un de moins ! Dans le détail : trois degrés pour l'épaule afin d'orienter le membre supérieur dans tous les secteurs d'espace, un degré au niveau du coude dont l'effet est d'écarter ou de rapprocher la main de l'épaule, et donc de la bouche… et **trois degrés pour le poignet** afin d'orienter la main. La solution pourrait donc logiquement consister en une énarthrose en cet endroit, articulation sphérique, comme l'épaule, située à l'extrémité du CubRadius… Essayons donc d'imaginer les conséquences biomécaniques d'une telle structure.

En premier lieu, deux possibilités s'offrent à l'imagination suivant que la composante sphérique est distale (Fig. 113), supportée par le carpe, ou proximale (Fig. 114), à l'extrémité du CubRadius. La première solution imposerait moins de complications à la structure du carpe ? Imaginons cependant la deuxième… L'inconvénient d'une énarthrose à ce niveau est évident : la rotation entre les deux parties, sur un très court espace, impose des efforts de cisaillement à toutes les structures franchissant en pont cette articulation, à commencer par les tendons (Fig. 115) : un schéma en perspective du carpe **a** fait apparaître un effet de raccourcissement **r** entraîné par toute rotation du segment distal. Sur une vue en coupe supérieur **b**, la rotation dans un sens **c** ou dans l'autre **d** oblige le tendon à parcourir un trajet plus long, d'où un raccourcissement relatif, avec un effet parasite de pseudo-contraction musculaire, difficile à compenser, surtout si, à partir de la position de rectitude (Fig. 116) vient s'ajouter un mouvement de latéralité (Fig. 117). Dans ce cas, l'effet de raccourcissement est double et les mouvements parasites qu'il entraîne sont impossibles à compenser. Le problème mécanique est le même pour les vaisseaux faciles à appréhender sur une vue perspective (Fig. 118) : les artères sont elles aussi soumises à un raccourcissement relatif associé à une torsion, mais plus facile à compenser par un trajet hélicoïdal de l'artère au repos. Dans la solution « à deux os » (Fig. 119) l'artère radiale est entraînée sur toute sa longueur par la rotation du radius.

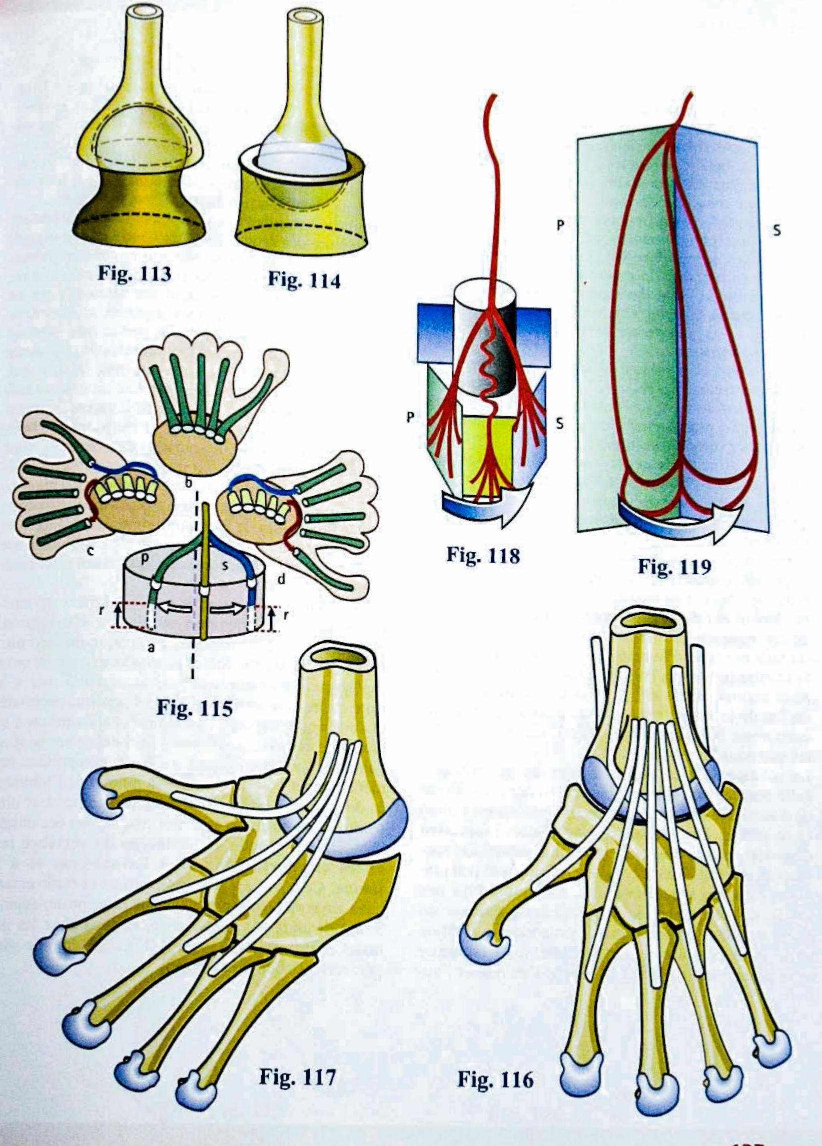


Fig. 113

Fig. 114

Fig. 115

Fig. 118

Fig. 119

Fig. 117

Fig. 116

Les problèmes de raccourcissement relatif des tendons empêchent l'installation des **muscles de puissance**, extenseurs et surtout fléchisseurs des doigts, au niveau de l'avant-bras : ces muscles dits **extrinsèques** doivent alors se situer **dans la main, devenant ainsi intrinsèques** : les conséquences sont considérables, on pourrait presque dire catastrophiques, car la puissance d'un muscle est proportionnelle à son volume. Il suffit d'imaginer, à puissance égale, la masse des fléchisseurs localisée dans la paume (Fig. 121) pour comprendre que **la main deviendrait quasiment inutilisable** pour la prise à pleine paume, qui dans la main normale (Fig. 120) permet de loger un objet relativement volumineux.

Les contours et le volume de la main en seraient profondément modifiés (Fig. 122) : elle deviendrait une « *main-battoir* », **a – b** volumineuse, encombrante, ayant perdu pratiquement toute valeur fonctionnelle, sans parler de son esthétique **c – d** !

Une telle structure retentirait sur l'ensemble de l'anatomie du corps, en raison de l'alourdissement de l'extrémité du membre supérieur (Fig. 123). Le **centre de gravité partiel du membre supérieur** – ou barycentre – situé normalement à proximité du coude (flèche bleue), se verrait déplacé près de l'extrémité, **à proximité du poignet** (flèche rouge). L'augmentation du moment d'action du membre supérieur entraînerait un **renforcement de la ceinture scapulaire**, et par voie de conséquence, celui du membre inférieur. C'est donc un nouveau type d'humain qui en résulterait, comme le montre le schéma composite ou le côté gauche est resté normal, tandis que le droit s'est trouvé modifié du fait de la simple transformation du poignet en une énarthrose. Nous sommes loin de l'homme (Fig. 126) tel que nous le connaissons !

La solution CubRadius ne se révélant pas pratique, celle des deux os apparaît la seule viable : le CubRadius se trouve dédoublé en cubitus (maintenant l'ulna) et en radius. Une question se pose alors : **comment disposer les deux os** (Fig. 124) **?** La disposition successive, en série, l'un après l'autre **a**, apparaît peu pratique, car cette articulation intermédiaire semble peu solide, car peu emboîtée ; impossible de soulever un piano ou même un sac à dos ! Il reste alors la solution de deux os côte à côte, en parallèle, mais là encore deux possibilités s'offrent à l'esprit : l'un devant l'autre **b** ou l'un à côté de l'autre **c**. Si le radius est situé devant l'ulna **b**, la flexion du coude risque de s'en trouver limitée. Le radius sur le même plan que l'ulna est la solution la plus pratique, surtout s'il est situé en dehors du cubitus – et non en dedans – car cela autorise l'utilisation des avantages du *cubitus valgus*, à savoir le changement d'orientation de l'axe de la main.

La **solution des deux os** complique indiscutablement la structure des articulations du coude et du poignet, en introduisant **deux articulations supplémentaires**, les radio-ulnaires supérieure et inférieure, mais elle résout bien des problèmes : celui des vaisseaux qui ne sont plus tordus sur un court segment, et en même temps celui des nerfs. Elle donne surtout une solution aux problèmes des muscles : les **muscles de puissance** peuvent être installés dans l'avant-bras, en tant que **muscles extrinsèques**, ce qui autorise un volume suffisant et rapproche le barycentre de la racine du membre ; les muscles contenus dans la main, les **intrinsèques**, ne sont plus que des **muscles de précision**, donc peu puissants et légers. La plupart des muscles insérés sur le radius *tournent en même temps* que lui et ne changent pas de longueur : il n'y a pas d'effet parasite sur les doigts lors de la rotation du poignet. Les rares muscles fléchisseurs insérés sur l'ulna subissent une rotation sur toute leur longueur, donc sans effet parasite.

L'apparition de ces deux os sur le segment intermédiaire des quatre membres remonte à 400 millions d'années (Fig. 125) lorsque, à l'époque du dévonien moyen, notre ancêtre lointain, un obscur poisson crossoptérygien, l'Eusthénopteron, sortit de la mer à la suite d'une transformation de ses nageoires pectorales et devint un tétrapode, semblable à un lézard ou à un crocodile actuels. Les rayons de ses nageoires se réorganisèrent progressivement **a – b – c**, comportant, immédiatement à la suite du rayon unique de l'humérus **h**, deux rayons côte à côte, les futurs radius **r** et ulna **u**, suivis des os du carpe et des cinq rayons des doigts. Depuis cette époque, **le prototype du vertébré terrestre comporta deux os à l'avant-bras et à la jambe**. Ce n'est que progressivement et tardivement, chez les vertébrés supérieurs, que cette prono-supination, prît toute son importance, et c'est chez les primates et enfin l'homo sapiens (Fig. 125) qu'elle atteignit son efficacité maximum.

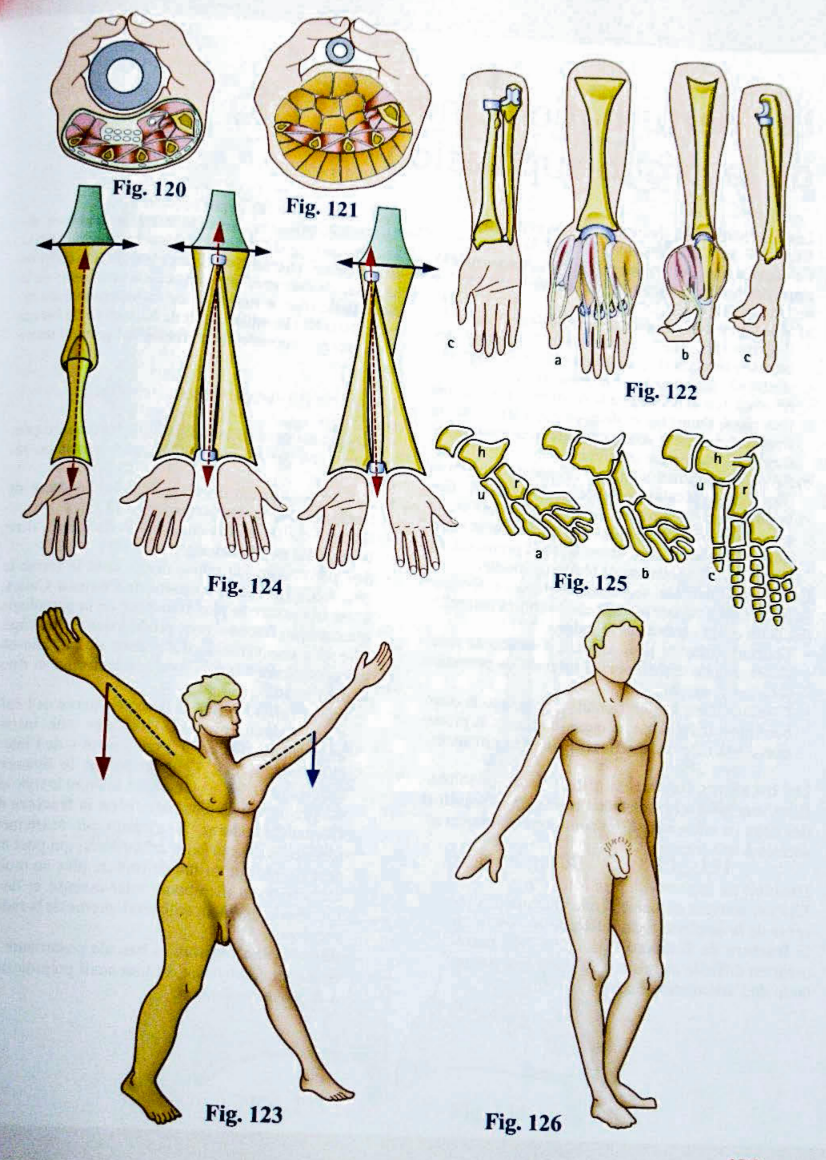


Fig. 120

Fig. 121

Fig. 122

Fig. 124

Fig. 125

Fig. 123

Fig. 126

Les perturbations mécaniques de la prono-supination

Les fractures des deux os de l'avant-bras (Fig. 127 et 128, d'après Merle d'Aubigné)

Le déplacement des fragments est différent suivant le siège des traits de fracture, il est conditionné par les actions musculaires.

a) Si le trait radial siège **au tiers supérieur** (Fig. 127), il sépare des fragments sur lesquels agissent des muscles antagonistes : supinateurs sur le fragment supérieur, pronateurs sur le fragment inférieur. Le décalage (on appelle ainsi la rotation des fragments l'un par à l'autre) sera dans ce cas maximum : le fragment supérieur sera en pronation extrême, l'inférieur en supination maximum.

b) Si le trait radial siège **à la partie moyenne** (Fig. 128) le décalage sera moins marqué. En effet, la pronation du fragment inférieur n'est due qu'au carré pronateur et la supination du fragment supérieur est modérée par l'action du rond pronateur. Le décalage sera globalement réduit de moitié.

La réduction doit non seulement corriger ce décalage angulaire mais encore rétablir les courbures naturelles des deux os, et surtout sur le radius :

- Courbure dans le plan sagittal, à concavité antérieure. Si elle est effacée ou inversée, la pronation sera moins ample ;
- Courbure dans le plan frontal : en pratique la courbure pronatrice, faute de quoi, là encore, la pronation est limitée par inefficacité du rond pronateur.

Les luxations des articulations radio-ulnaires

Elles sont rarement isolées en raison de la solidarité des deux os entre eux. Elles sont donc volontiers associées à une fracture :

Luxation de la radio-ulnaire inférieure

Elle est souvent associée à une fracture sus-jacente de la diaphyse radiale (flèche bleue). C'est la **fracture de Galeazzi** (Fig. 129). Son traitement est difficile en raison de l'instabilité persistante de l'articulation luxée.

Luxation de la radio-ulnaire supérieure

Son homologue « symétrique » est la **fracture de Monteggia** (Fig. 130), associant une fracture de la diaphyse ulnaire (flèche bleue), par choc direct (coup de bâton ou de matraque) et une luxation antérieure de la tête radiale (flèche rouge). Il est indispensable de reposer cette tête instable du fait de la traction du biceps **B** en position normale et de réparer le ligament annulaire.

Les effets du raccourcissement relatif du radius

Le fonctionnement de la radio-ulnaire inférieure peut être perturbé par un raccourcissement relatif du radius :

- Soit par croissance insuffisante après **fracture de l'enfance passée inaperçue** (Fig. 132) ;
- Soit par malformation congénitale du radius, dans la **maladie de Madelung** (Fig. 131) ;
- Soit par fracture du radius distal, dont la forme la plus fréquente est la **fracture de Pouteau-Colles**. C'est la fracture la plus fréquente de la pathologie traumatique, frappant avec prédilection le sujet âgé. Elle crée une véritable dislocation de la radio-ulnaire inférieure à la fois dans le plan frontal et dans le plan sagittal ;
  - **dans le plan frontal**, la bascule externe de l'épiphyse radiale (Fig. 133) entraîne une incongruence articulaire par « bâillement » de l'interligne vers le bas. La traction sur le ligament triangulaire (Fig. 134) arrache souvent la styloïde ulnaire, fracturée à sa base ; c'est la **fracture de Gérard-Marchant**. Il s'ensuit un écartement (diastasis) des surfaees articulaires, qui peut encore s'aggraver du fait de rupture plus ou moins étendue de la membrane inter-osseuse et de la rupture du ligament collatéral interne de la radio-carpienne.
  - **dans le plan sagittal**, la bascule postérieure du fragment épiphysaire est tout aussi préjudiciable à la prono-supination.

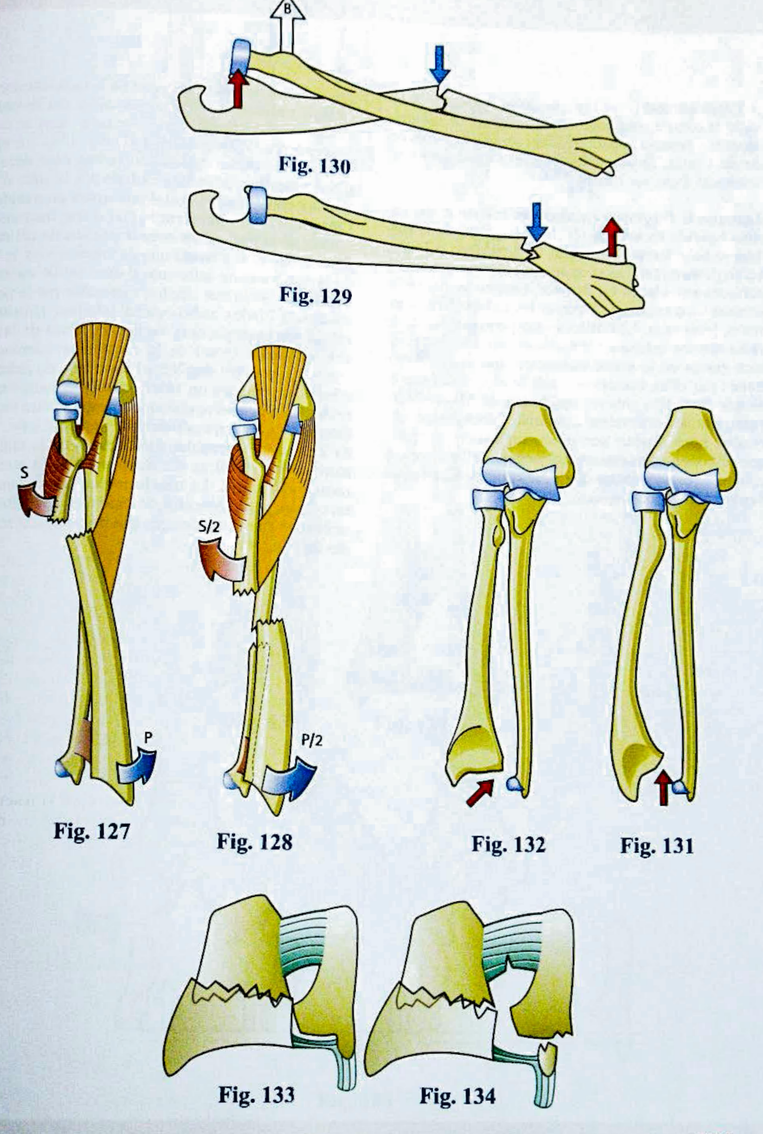


Fig. 130

Fig. 129

Fig. 127

Fig. 128

Fig. 132

Fig. 131

Fig. 133

Fig. 134

À l'état normal (Fig. 135), les axes des surfaces radiale et ulnaire sont confondus : les deux os montrés séparés **a** laissent apparaître leurs surfaces en concordance. Lorsqu'ils sont réunis **b**, elles s'appliquent parfaitement l'une sur l'autre.

Lorsque le fragment épiphysaire inférieur du radius bascule en arrière (Fig. 126 a), l'axe de la surface radiale forme, avec celui de la surface cubitale, un angle ouvert en bas et en arrière : la congruence des surfaces articulaires est détruite, comme le montre le schéma **b** où seuls sont figurées les surfaces articulaires et leurs axes. Les dislocations permanentes de la radio-ulnaire inférieure entraînent souvent des troubles graves de la prono-supination, qui peuvent être traités par deux opérations : soit la résection pure et simple de la tête ulnaire : **opération de Moore-Darrach**, soit son arthrodèse définitive (blocage) qui nécessite, pour rétablir une prono-supination normale, une résection segmentaire sus-jacente de la diaphyse ulnaire. C'est le principe de **l'opération de Kapandji-Sauvé** (Fig. 137).

Les troubles de fonctionnement de la radio-ulnaire inférieure peuvent aussi être consécutifs à des lésions de l'articulation radio-ulnaire supérieure, dans le cadre du **syndrome d'Essex-Lopresti** (Fig. 138). En effet, un raccourcissement relatif du radius peut découler d'une **résection de la tête radiale a** à la suite d'une fracture comminutive, soit d'une **usure anormale de l'interligne ulno-huméral b**, soit d'une fracture-tassement de la tête radiale avec impaction du col radial dans la tête **c**. Il s'ensuit une dislocation vers le haut de la radio-ulnaire inférieure **d** avec saillie anormale vers le bas de la tête ulnaire, mesurable par la positivation de l'index radio-cubital inférieur (*Ulnar Variance* des anglophones). Seules les fibres de la couche antérieure (rose) de la membrane interosseuse (Fig. 139) peuvent empêcher l'ascension du radius. Si elles sont rompues on insuffisantes, la radio-ulnaire inférieure s'en trouve disloquée, ce qui réalise un syndrome d'Essex-Lopresti, de traitement difficile.
Ce chapitre des troubles fonctionnels de la radio-ulnaire inférieure est en développement et en remaniements permanents. La conclusion qu'on peut en tirer est que les plus fréquentes, les fractures de l'extrémité inférieure du radius, doivent être parfaitement traitées dès le début.

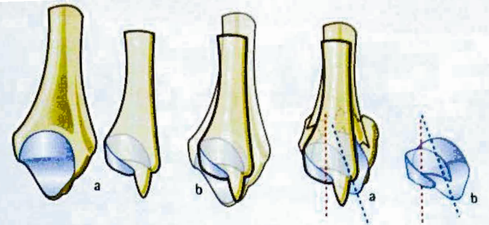


Fig. 135

Fig. 136

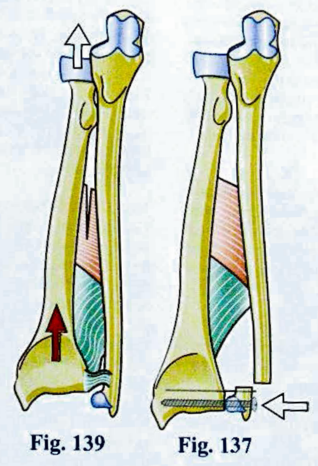


Fig. 139

Fig. 137

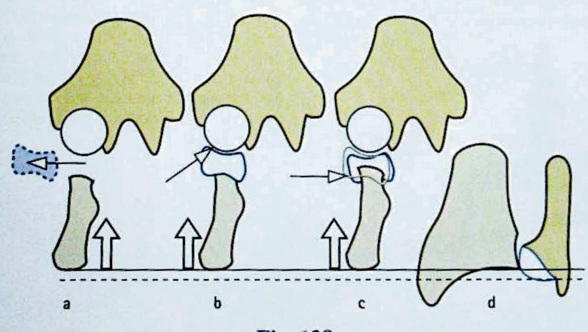


Fig. 138

Suppléances et position de fonction

« On supine avec l'avant-bras » comme lorsqu'on tourne une clé dans une serrure (Fig. 140).
En effet, le membre supérieur étant accolé le long du tronc, coude fléchi, il n'existe d'autre possibilité que d'effectuer ce mouvement par rotation sur l'axe longitudinal de l'avant-bras, au niveau des articulations radio-ulnaires. On pourrait l'appeler supination vraie car l'épaule ne peut intervenir dans ce mouvement. Ceci explique qu'une paralysie de la supination soit difficile à suppléer. Ceci est compensé par le fait que la supination est rarement paralysée complètement, car le biceps possède une commande nerveuse différente (nerf musculo-cutané) de celle du court supinateur (nerf radial).
« On prône avec l'épaule » (Fig. 141)
Pour la pronation, par contre, l'action des muscles pronateurs purs peut facilement être amplifiée ou suppléée par l'abduction de l'épaule. C'est le mouvement effectué pour verser le contenu d'une casserole. Avec 90° d'abduction de l'épaule, on obtient une pronation normale à 90° de la main.

La position de fonction

Pour la prono-supination, cette position se situe entre :

- La position intermédiaire (Fig. 142), adoptée par exemple lorsqu'on tient un marteau ;
- Et la position de demi-pronation lorsqu'on tient une cuillère (Fig. 143) ou qu'on écrit (Fig. 144), correspondant à 30-45° de pronation.

La position de fonction correspond à un état d'équilibre naturel entre les groupes musculaires antagonistes, donc à la dépense musculaire la plus faible possible.

Le mouvement de prono-supination est **indispensable pour porter la nourriture à la bouche**. En effet, lorsqu'on ramasse un aliment reposant sur un plan horizontal, une table ou à même le sol, la main effectue son approche en pronation, pour saisir l'objet par-dessus, et le coude s'étend. Pour le porter à la bouche, il faut à la fois fléchir le coude et présenter cet aliment en supination, le biceps est donc le muscle le mieux adapté pour ce **mouvement alimentaire** puisqu'il est à la fois fléchisseur du coude et supinateur.
Par ailleurs, on peut constater que **la supination économise la flexion du coude** : s'il fallait porter le même objet à la bouche en conservant une attitude de pronation, ce geste nécessiterait une flexion du coude plus importante.

Test du serveur

Comme pour l'épaule, on peut explorer globalement la fonction du coude par un **mouvement d'épreuve**, un test, comme disent les anglophones, le **mouvement du serveur ou du garçon de café**. Lorsque le serveur arrive, portant son plateau au-dessus de son épaule (Fig. 145), son coude est fléchi et son poignet en extension complète et en pronation. Quand il vient déposer son plateau chargé de verres sur votre table (Fig. 146), il effectue un triple mouvement d'extension du coude, de flexion du poignet jusqu'à la rectitude et **surtout de supination**. L'amplitude de ce mouvement est complète, et l'on peut dire que le « **Test du serveur** » permet de faire un diagnostic, même à distance par téléphone, de supination complète : si vous pouvez porter sur un plateau un verre plein sans le renverser, vous êtes sûr que vous n'avez aucun déficit de supination, mouvement important pour de nombreux actes de la vie quotidienne, à commencer par ramasser sa monnaie à la caisse du supermarché (ou mendier à la porte des églises !).

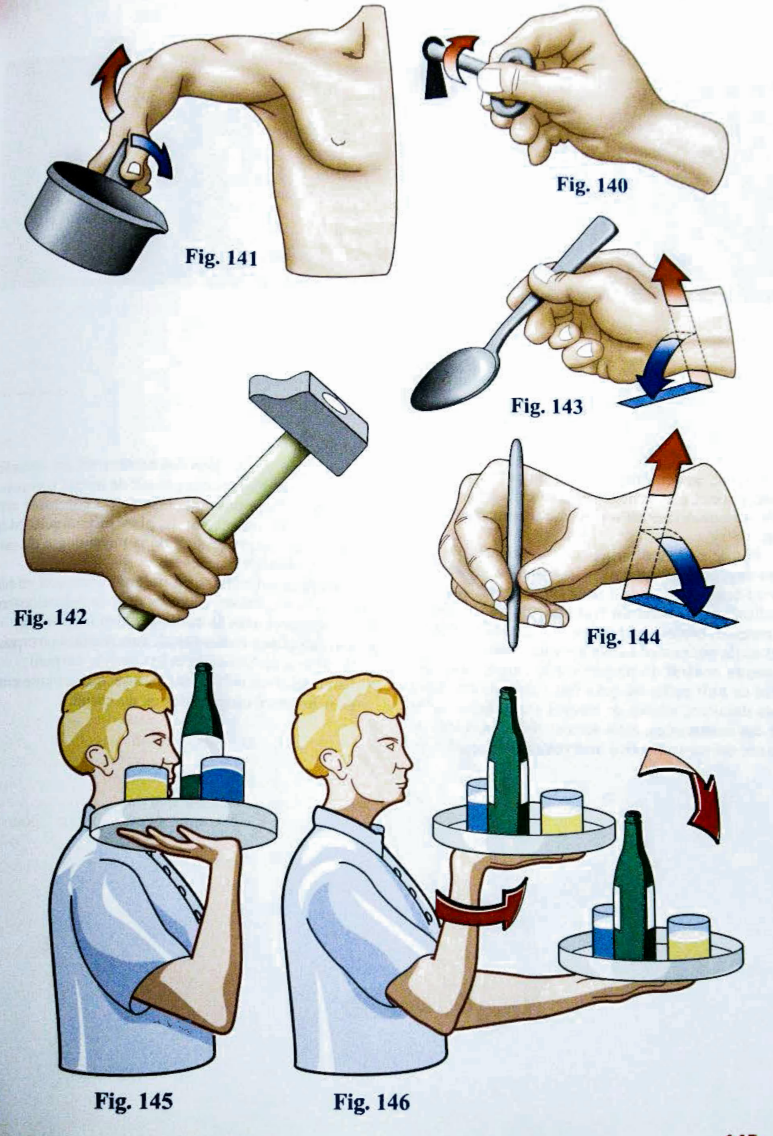


Fig. 140

Fig. 141

Fig. 142

Fig. 143

Fig. 144

Fig. 145

Fig. 146

Chapitre 4

LE POIGNET

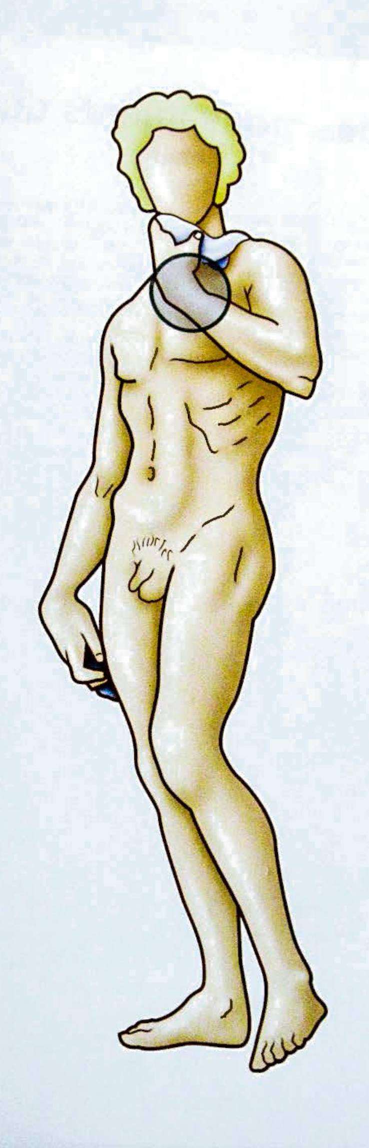
Le poignet, **articulation distale du membre supérieur**, permet à la main – segment effecteur – **de se présenter dans la position optimum pour la préhension**.

En effet, le complexe articulaire du poignet possède **deux degrés de liberté**. Avec la **prono-supination** de l'avant-bras, rotation de l'avant-bras sur son axe longitudinal, **qui rajoute un troisième degré de liberté au poignet**, la main peut être orientée sous n'importe quel angle pour saisir ou soutenir un objet.

Le **noyau central** du poignet est le **carpe**, ensemble formé de **huit petits os**, qui a fait l'objet au cours des trente dernières années de travaux très poussés de la part des anatomistes, mais surtout des chirurgiens de la main, qui sont amenés à intervenir quotidiennement sur le poignet. Aussi, bien des notions ont été complètement renouvelées, ce qui permet de mieux comprendre la physiologie très complexe de cet ensemble articulaire très déroutant sur le plan mécanique. Mais l'étude et la compréhension de la physiologie du poignet sont loin d'être achevées.

Le **complexe articulaire du poignet** comporte en réalité deux articulations, incluses dans le même ensemble fonctionnel **avec la radio-ulnaire inférieure** :

- **L'articulation radio-carpienne**, mettant en rapport la glène anté-brachiale et le condyle carpien ;
- **L'articulation médio-carpienne**, qui articule entre elles les deux rangées des os du carpe.



Définition des mouvements du poignet

Les mouvements du poignet (Fig. 1) s'effectuent autour de deux axes, la main étant en position anatomique c'est-à-dire en supination complète :

- Un axe **AA'**, **transversal**, compris dans un plan frontal **T**. Autour de cet axe s'effectuent les **mouvements de flexion-extension** dans le plan sagittal :
  - **flexion** (flèche **1**) : la face antérieure - ou palmaire - de la main se rapproche de la face antérieure de l'avant-bras ;
  - **extension** (flèche **2**) : la face postérieure - ou dorsale - de la main se rapproche de la face postérieure de l'avant-bras. Il est préférable de ne pas utiliser les termes de flexion dorsale, en contradiction avec les muscles extenseurs, et a fortiori de flexion palmaire, ce qui est une tautologie.
- Un axe **BB'**, **antéro- postérieur**, compris dans un plan sagittal **S**. Autour de cet axe s'effectuent dans le plan frontal les **mouvements d'adduction-abduction**, que certains nomment abusivement, à la suite des anglo-saxons, inclinaison ou déviation ulnaire ou radiale (*Ulnar Deviation* et *Radial Deviation*) :
  - **adduction** - ou inclinaison ulnaire - (flèche 3) : la main se rapproche de l'axe du corps et son bord interne - ou bord ulnaire (celui qui porte le cinquième doigt) – forme avec le bord interne de l'avant-bras, un angle obtus ouvert en dedans ;
  - **abduction** - ou inclinaison radiale - (flèche 4) : la main s'éloigne de l'axe du corps et son bord externe - ou bord radial (celui qui porte le pouce) - forme, avec le bord externe de l'avant-bras, un angle obtus ouvert en dehors.

En réalité, les mouvements naturels du poignet sont combinés sur des axes obliques :

- **Flexion/Adduction** et ;
- **Extension/Abduction**.

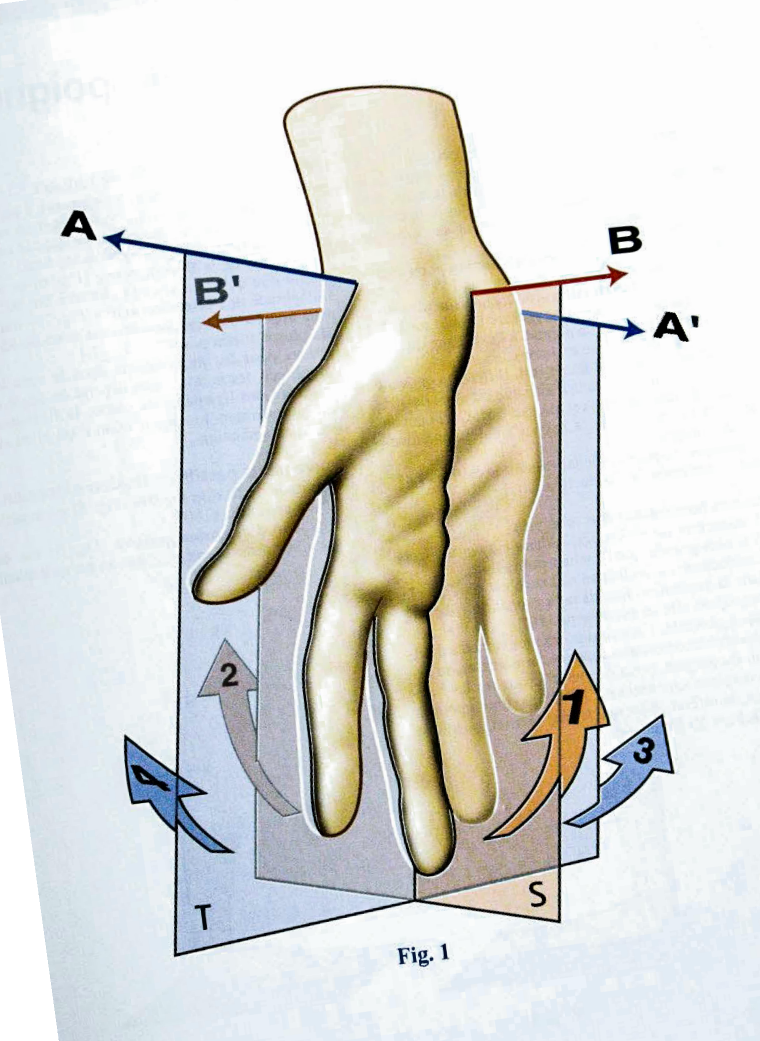


Fig. 1

Amplitude des mouvements du poignet

Mouvement d'abduction-adduction

L'amplitude des mouvements se mesure à partir de la **position de référence** (Fig. 2) : l'axe de la main, matérialisé par le troisième métacarpien et le troisième doigt, se situe dans le prolongement de l'axe de l'avant-bras.

L'amplitude du mouvement **d'abduction** – ou inclinaison radiale – (Fig. 3) ne dépasse pas 15°.

L'amplitude de **l'adduction** – ou inclinaison ulnaire – (Fig. 4) est de 45°, lorsqu'on mesure l'angle sur la ligne joignant le milieu du poignet à l'extrémité du troisième doigt (ligne bleue en tirets).

Cependant, cette amplitude est différente suivant qu'on considère l'axe de la main : elle est alors de 30°, ou l'axe du médius : elle est alors de 55°. Ceci tient au fait qu'à l'adduction de la main s'ajoute une adduction des doigts.

En pratique, on peut cependant retenir le chiffre de 45° pour l'amplitude de l'adduction.

Plusieurs faits doivent être soulignés :

- L'adduction ou inclinaison ulnaire est deux à trois fois plus grande que l'inclinaison radiale.
- L'adduction ou inclinaison ulnaire est plus ample dans la supination que dans la pronation (Sterling Bunell) où elle ne dépasse pas 10°.

De façon générale, l'amplitude des mouvements d'adduction-abduction est minimum en forte flexion ou extension du poignet, positions pour lesquelles les ligaments carpiens sont tendus. Elle est maximum pour la position de référence ou une légère flexion, positions qui relâchent les ligaments.

Mouvements de flexion-extension

L'amplitude des mouvements se mesure à partir de la **position de référence** (Fig. 5) : poignet en rectitude, la face dorsale de la main est située dans le prolongement de la face postérieure de l'avant-bras.

L'amplitude de la **flexion active** (Fig. 6) est de 85°, c'est-à-dire qu'elle n'atteint pas tout à fait 90°.

L'amplitude **de l'extension active** (Fig. 7) – improprement appelée flexion dorsale – est aussi de 85°. Elle non plus n'atteint pas 90°.

Comme pour les mouvements dans le sens latéral, l'amplitude des mouvements dépend du degré de relâchement des ligaments du carpe : la flexion-extension est maximum lorsque la main n'est ni en adduction, ni en abduction

Mouvements passifs de flexion-extension

L'amplitude de **flexion passive** (Fig. 8) est supérieure à 90° en pronation (100°).

L'amplitude **d'extension passive** (Fig. 9) est supérieure à 90° aussi bien en pronation qu'en supination (95°).

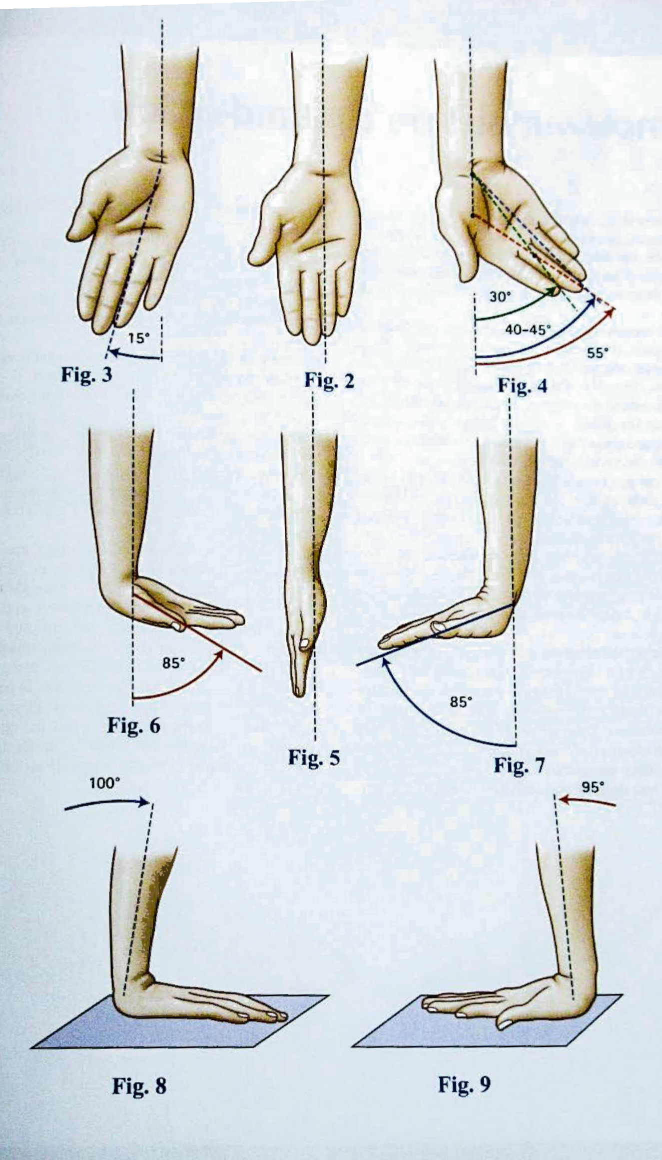


Fig. 3

Fig. 2

Fig. 4

Fig. 6

Fig. 5

Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

Le mouvement de circumduction

Le mouvement de circumduction se définit comme étant la combinaison des mouvements de flexion-extension avec les mouvements d'adduction-abduction. Il s'agit donc d'un mouvement s'effectuant simultanément par rapport aux deux axes de l'articulation du poignet.

Lorsque le mouvement de circumduction est poussé à son maximum d'amplitude, l'axe de la main décrit dans l'espace une surface conique, dite cône de circumduction (Fig. 10). Ce cône comporte un sommet **O**, situé au centre du poignet, et une base définie sur la figure par les points **F**, **R**, **E**, **C** qui représentent la trajectoire parcourue par l'extrémité du médius lors du mouvement de circumduction maximum.

Ce cône n'est pas régulier, car sa base n'est pas circulaire. Ceci tient au fait que l'amplitude des différents mouvements élémentaires n'est pas symétrique par rapport au prolongement de l'axe de l'avant-bras **OO'**. L'amplitude étant maximum dans le plan sagittal **FOE** et minimum dans le plan frontal **ROC**, le cône est aplati transversalement et sa base ressemble à une ellipse (Fig. 11) à grand axe antéro-postérieur **FE**.

Cette ellipse est elle-même déformée vers le dedans (Fig. 12) du fait de l'amplitude plus grande de l'inclinaison ulnaire. Il s'ensuit que l'axe du cône de circumduction **OA** n'est pas confondu avec **OO'**, mais se trouve en inclinaison ulnaire de 15°. La position de la main en adduction à 15° correspond d'ailleurs à la position d'équilibre entre les muscles commandant l'inclinaison. C'est un élément de la position de fonction.

Outre la base du cône de circumduction (Fig. 11), on distingue :

- La coupe du cône par le plan frontal (Fig. 12) avec la position d'abduction **R** et d'adduction **C** et l'axe du cône de circumduction **OA** ;
- La coupe du cône par le plan sagittal (Fig. 13) avec la position en flexion **F** et la position en extension **E**.

L'amplitude des mouvements du poignet étant moins marquée en pronation qu'en supination, il en résulte que le cône de circumduction est moins ouvert en pronation.

Cependant, grâce aux mouvements de prono-supination associés, l'aplatissement du cône de circumduction peut être compensé dans une certaine mesure et l'axe de la main peut occuper toutes les positions à l'intérieur d'un cône dont l'angle d'ouverture est de 160 à 170°.

En outre, comme dans toutes les articulations de type **cardan**, à deux axes et deux degrés de liberté, ainsi que nous le verrons plus loin à propos de l'articulation trapézo-métacarpienne, un mouvement simultané ou successif autour des deux axes entraîne une **rotation automatique** ou encore **rotation conjointe** (Mac Conaill) autour de l'axe longitudinal du segment mobile, c'est-à-dire de la main, qui oriente la paume dans une direction oblique par rapport au plan de la face antérieure de l'avant-bras. Ceci n'est net que dans les positions d'extension-adduction et de flexion-adduction, mais n'a pas la même importance fonctionnelle qu'au pouce.

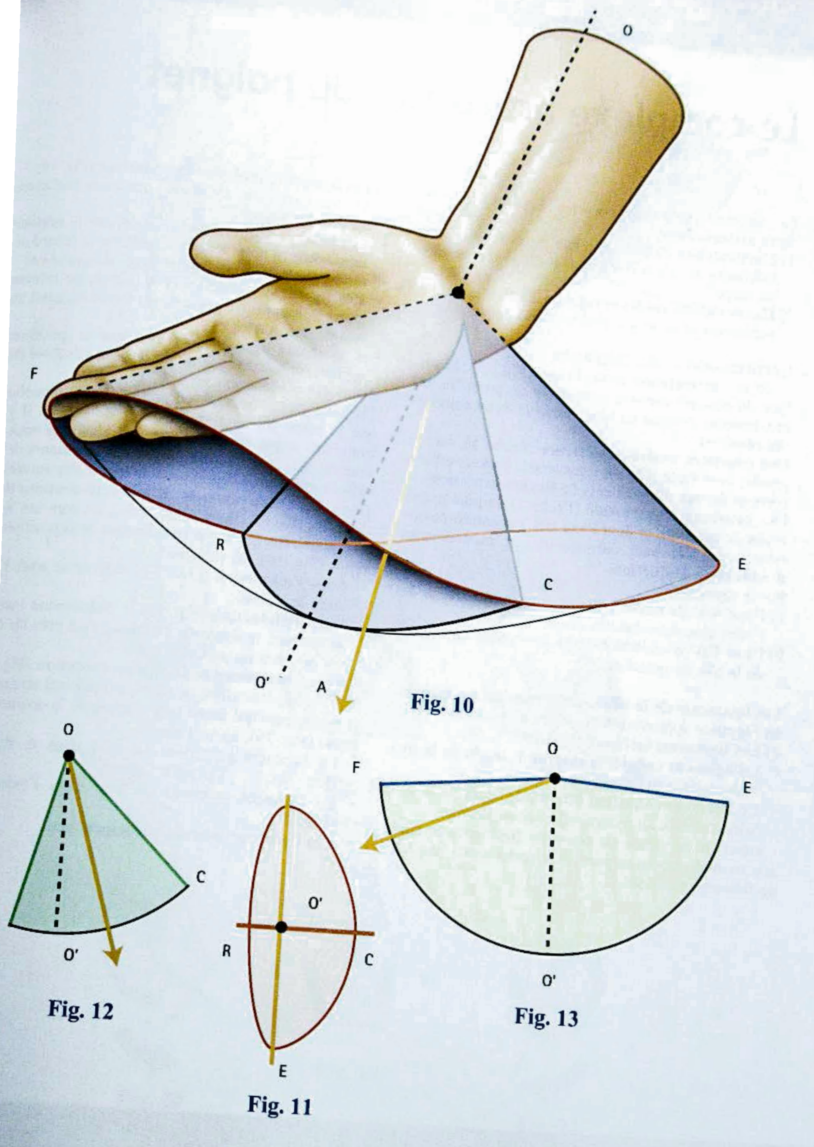


Fig. 10

Fig. 12

Fig. 11

Fig. 13

Le complexe articulaire du poignet

Le complexe articulaire du poignet (Fig. 14) comporte **deux articulations**:
1) **L'articulation radio-carpienne** 1 entre l'extrémité inférieure du radius et les os de la rangée supérieure du carpe;
2) **L'articulation médio-carpienne** 2 entre la rangée supérieure et la rangée inférieure du carpe.

L'articulation radio-carpienne

C'est une **articulation condylienne** (Fig. 15): la surface du condyle carpien, considérée en première approximation, comme un bloc, présente **deux courbures convexes**:
Une **courbure antéro-postérieure** (flèche **1**), ou sagittale, dont l'axe **AA'** est transversal: cette courbure correspond aux mouvements de **flexion-extension**;
Une **courbure transversale** (flèche **2**) de plus grand rayon de courbure et dont l'axe BB' est antéro-postérieur: cette courbure correspond aux mouvements **d'adduction-abduction.**
Sur le squelette:
1) L'axe **AA'** de flexion-extension passe au niveau de l'interligne semi-lunaire grand os;
2) L'axe **BB'** d'adduction-abduction passe au niveau de la tête du grand os.

Les **ligaments de la radio-carpienne** sont organisés, en première approximation, en deux systèmes:
1) **Les ligaments latéraux** (Fig. 16, 17, 18):
- **Le ligament collatéral externe 1**, tendu de la styloïde radiale au scaphoïde;
- **Le ligament collatéral interne 2**, tendu de la styloïde cubitale au pyramidal et au pisiforme.

L'insertion inférieure de ces deux ligaments se situe approximativement au point de « sortie » de l'axe AA' de flexion-extension.

2) **Les ligaments antérieur et postérieur** (Fig. 19, 20, 21 : vue externe schématique) que nous étudierons en détail plus loin:
- **Les ligaments antérieurs** 3 (ou plutôt le **système ligamentaire antérieur**) se fixent sur le rebord antérieur de la glène radiale et le col du grand os;
- **Les ligaments postérieurs** 4 (ou plutôt le **complexe ligamentaire postérieur**) forme lui aussi une sangle postérieure.

Les systèmes ligamentaires antérieur et postérieur s'ancrent sur le carpe aux points de *sortie* de l'axe **BB'** d'abduction-adduction.
Toujours en considérant, en première approximation, que le carpe est mono-bloc, ce qu'on pensait il y a trente ans et qui est loin d'être vrai ainsi que nous le verrons plus loin, la **mise en jeu des ligaments** de la radio-carpienne se décompose de la manière suivante:
Dans les **mouvements d'adduction-abduction** (Fig. 16, 17, 18: vues antérieures), ce sont les ligaments latéraux qui travaillent. Partant de la position de repos (Fig. 16), on voit que:
- **Dans l'adduction** (Fig. 17) l'externe se tend, l'interne se détend;
- **Dans l'abduction** (Fig. 18) le phénomène inverse se produit, le ligament antérieur, fixé près du centre de rotation, participe peu.

Dans les **mouvements de flexion-extension** (Fig. 19, 20, 21 : vue latérales), ce sont les ligaments antérieurs et postérieurs qui travaillent. Partant de la position de repos (Fig. 19), on voit que:
- Le ligament postérieur se tend dans la flexion (Fig. 20);
- Le ligament antérieur se tend dans l'extension (Fig. 21);
- Les ligaments latéraux participent peu.

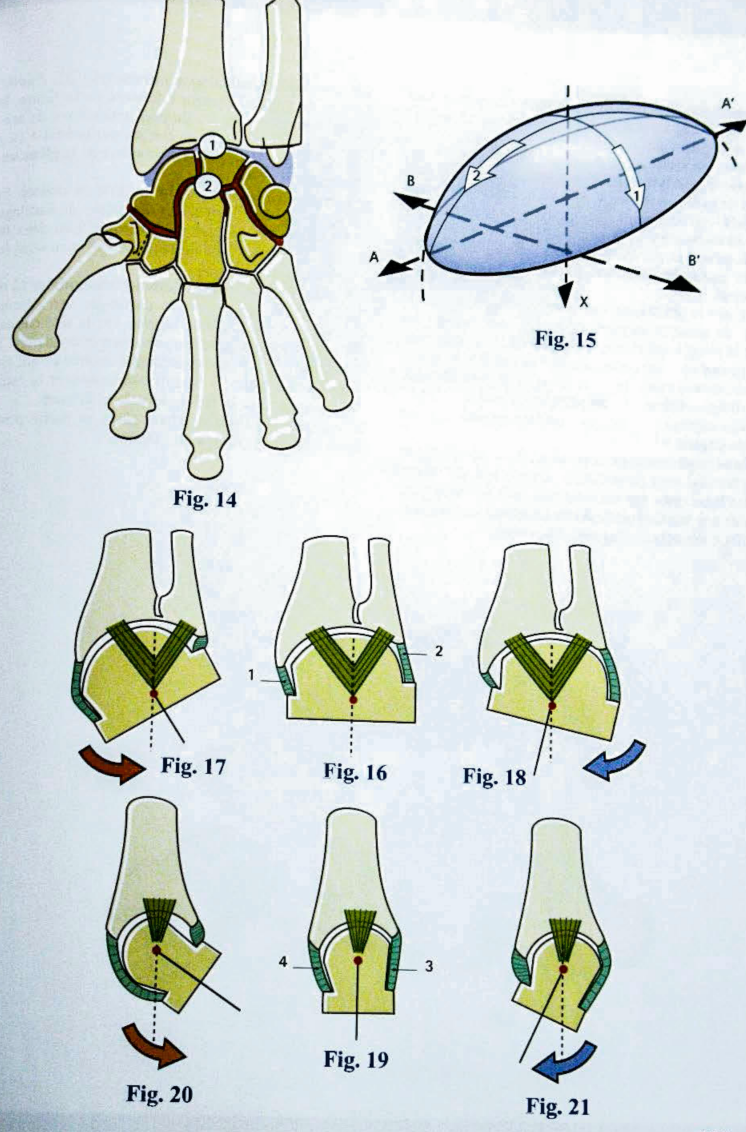


Fig. 14

Fig. 15

Fig. 17

Fig. 16

Fig. 18

Fig. 20

Fig. 19

Fig. 21

Les surfaces articulaires de la radio-carpienne sont (Fig. 22 et 23, légendes communes) : le condyle carpien et la glène antibrachiale.
Sur une **vue antérieure** du carpe éclaté (Fig. 23) on voit que le **condyle carpien** est formé par la juxtaposition de la face supérieure de trois os de la rangée supérieure - ce sont, de dehors en dedans : le **scaphoïde** **1**, le **semi-lunaire** **2**, le **pyramidal** **3** ou *triquetrum*, réunis entre eux par les **ligaments scaphoïdo-lunaire** **s.l.** et **pyramido-lunaire** **p.l** encore appelé luno-triquetral.
Notez que le **pisiforme** **4** ne participe pas à la constitution du condyle carpien, et, à plus forte raison, les os de la rangée inférieure, le **trapèze** **5**, le **trapézoïde** **6**, le **grand os** **7** ou *capitatum* et l'**os crochu** **8** ou *hamatum*, réunis entre eux par les trois **ligaments trapézo-trapézoïdien** **t.t.**, **trapézoïdo-grand os** ou trapézoïdo-capital **t.c** et **os crochu-grand os** ou hamato-capital **h.c**.
Les faces supérieures du scaphoïde, du semi-lunaire et du pyramidal sont recouvertes de cartilage, de même que les ligaments qui unissent ces trois os entre eux, formant une **surface articulaire continue**, constituant la surface articulaire du condyle carpien.

Sur une vue de l'articulation ouverte (Fig. 22, d'après Testut), on voit, à la partie inférieure de la figure, le condyle carpien avec les facettes articulaires du **scaphoïde** **1**, du **semi-lunaire** **2** et du **pyramidal** **3** et, à la partie supérieure, la surface concave de la **glène antibrachiale** formée par :

- **L'extrémité inférieure du radius**, en dehors. Sa face inférieure, concave et encroûtée de cartilage, est subdivisée par une crête mousse **9** en deux facettes correspondant au scaphoïde **10** et au semi-lunaire **11** ;
- La **face inférieure du ligament triangulaire** **12** est concave et recouverte de cartilage ; son sommet s'insère sur la styloïde ulnaire **13** ; la tête cubitale **14** le déborde légèrement en avant et en arrière. Sa base est parfois incomplètement insérée ce qui crée une petite fente **15** faisant communiquer la radio-carpienne avec la radio-cubitale inférieure.

La capsule **16**, figurée intacte dans sa partie postérieure, réunit le condyle et la glène.

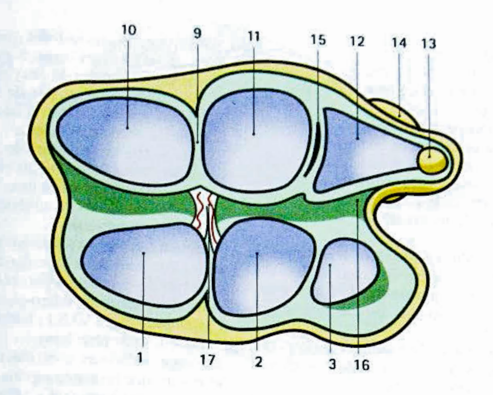


Fig. 22

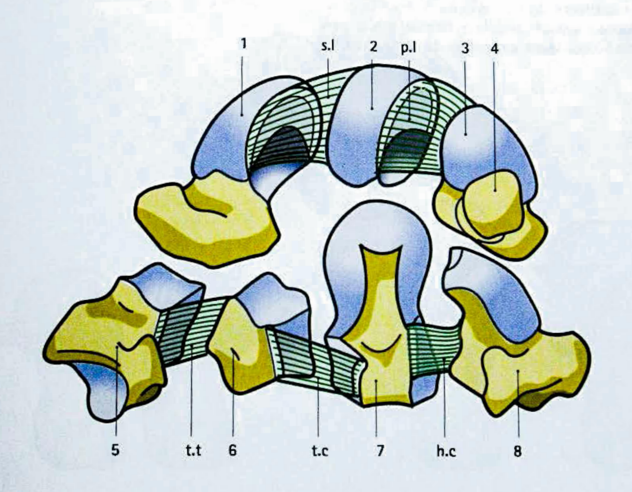


Fig. 23

L'articulation médio-carpienne

La médio-carpienne (Fig. 24, figurée ouverte par en arrière d'après Testut) située entre les deux rangées des os du carpe, comporte :

1) **La surface supérieure,** en vue postéro-inférieure. Elle est constituée de dehors en dedans par :
- Le **scaphoïde**, avec deux facettes inférieures, légèrement convexes, l'une pour le trapèze **1**, l'autre, en dedans, pour le trapézoïde **2** ;
- Une facette interne **3**, fortement concave, pour le grand os ;
- La facette inférieure du **semi-lunaire 4**, concave en bas, qui s'articule avec la tête du grand os ;
- La facette inférieure du **pyramidal 5**, concave en bas et en dehors, qui s'articule avec la face supérieure de l'os crochu.

Le pisiforme, articulé sur la face antérieure du pyramidal, ne participe pas à la constitution de l'interligne médio-carpienne. Il n'est pas visible sur cette vue.

2) **La surface inférieure,** en vue postéro-supérieure. Elle est constituée de dehors en dedans par :
- La facette supérieure du **trapèze 6** et du **trapézoïde** 7 ;
- La tête du **grand os 8**, s'articulant avec le scaphoïde et le semi-lunaire ;
- La face supérieure de **l'os crochu 9** dont la plus grande partie s'articule avec le pyramidal et une petite facette **10** qui vient au contact du semi-lunaire.

En considérant chacune des rangées du carpe comme formant un bloc, on constate que l'interligne médio-carpienne est formée de deux parties :
- **Une partie externe,** formée de facettes planes (trapèze et trapézoïde sur la base du scaphoïde), articulation du type **arthrodie** ;
- **Une partie interne,** formée par la surface convexe en tous sens de la tête du grand os et de l'os crochu, venant s'encastrer dans la surface concave des trois os de la rangée supérieure : c'est une **articulation condylienne**.

La **tête du grand os** forme un pivot central sur lequel le semi-lunaire peut basculer latéralement (Fig. 25), effectuer des rotations axiales (Fig. 26), et surtout basculer dans les sens antéro-postérieur (Fig. 19) : vers l'arrière a dans la V.I.S.I., bascule vers l'avant b dans la D.I.S.I. (voir plus loin).

La rangée inférieure constitue un bloc relativement rigide alors que la rangée supérieure, considérée comme un « **segment intercalé** » entre la glène radiale et la deuxième rangée, comporte, grâce au jeu ligamentaire, des mouvements d'ensemble et des déplacements relatifs des os l'un par rapport à l'autre.

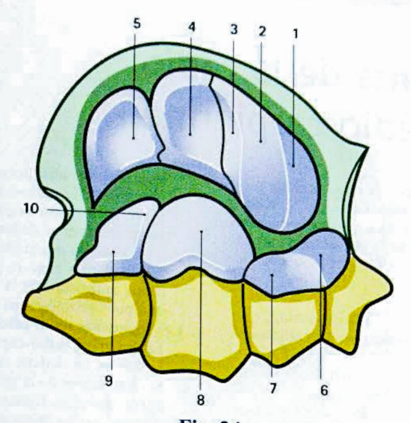


Fig. 24

Fig. 25

a

b

Fig. 26

Fig. 27

Les ligaments de la radio et de la médio-carpienne

La description des ligaments de la radio et de la médio-carpienne évolue sans cesse. Celle de N. Kuhlmann (1978) nous semble la plus à même d'expliquer leur rôle dans la stabilité du carpe et surtout dans son adaptation aux contraintes découlant des mouvements du poignet.

- **Sur une vue antérieure** (Fig. 28), on distingue :
  - **Les deux ligaments latéraux de la radio-carpienne**
  - Le **ligament latéral interne**, dont l'origine se fixe sur la styloïde ulnaire et s'intrique avec l'insertion du **ligament triangulaire 1** au niveau de son sommet. De là, il se divise en un **faisceau postérieur stylo-pyramidal 2** et un **faisceau antérieur stylo-pisiformien 3**. Il semble que, pour les auteurs modernes, ce ligament ne joue qu'un rôle secondaire dans la physiologie du carpe ;
  - Le **ligament latéral externe**, lui aussi formé de deux faisceaux, prenant origine sur la styloïde radiale : un **faisceau postérieur 4**, allant du sommet de la styloïde à la face externe du scaphoïde pour se fixer juste au-dessous de la surface articulaire supérieure, **un faisceau antérieur 5**, très épais et résistant, étendu du bord antérieur de la styloïde au tubercule du scaphoïde.
- **Le ligament antérieur de la radio-carpienne, formé de deux faisceaux :**
  - En dehors, le **faisceau radio-lunarien antérieur 6**, tendu obliquement en bas et en dedans du rebord antérieur de la glène radiale à la corne antérieure du semi-lunaire, d'où son nom de **frein antérieur du lunaire** ;
  - En dedans, le **faisceau radio-pyramidal antérieur 7** individualisé par N. Kuhlmann ; ses insertions supérieures occupent la moitié interne du bord antérieur de la glène et tout le bord antérieur de la cavité sigmoïde du radius où il se tisse avec les insertions radiales du ligament antérieur **8** de la radio-cubitale inférieure ; ce ligament, de forme triangulaire, fort et résistant, se porte en bas et en dedans pour se fixer sur la face antérieure du pyramidal, en dehors de sa facette d'articulation avec le pisiforme ; il constitue la partie antérieure de la « fronde du pyramidal », que nous retrouverons plus loin.
- **Les ligaments de la médio-carpienne**
  - Le **ligament radio-capital 10** tendu obliquement en bas et en dedans de la partie externe du rebord antérieur de la glène à la face antérieure du col du grand os. Il est compris dans le même plan fibreux que les faisceaux radio-lunarien et radio-pyramidal. C'est à la fois un ligament antérieur de la radio-carpienne et de la médio-carpienne ;
  - Le **ligament lunaro-capital 12**, tendu verticalement de la corne antérieure du semi-lunaire à la face antérieure du col du grand os, il prolonge vers le bas le ligament radio-lunarien ;
  - Le **ligament triquetro-capital 13**, tendu obliquement en bas et en dehors de la face antérieure du pyramidal au col du grand os où se trouve ainsi constitué avec les deux ligaments précédents un véritable relais ligamentaire ;
  - À la face antérieure du grand os se situe un point de convergence ligamentaire **14** sommet du V de Poirier ;
  - Le **ligament scapho-trapézien 15**, court mais large et résistant, unissant le tubercule du scaphoïde à la face antérieure du trapèze au-dessus de sa crête oblique ;
  - Le **ligament triqueto-crochu** (ou triqueto-hamatal) **17**, véritable ligament latéral interne de la médio-carpienne ;
  - Enfin, les **ligaments pisi-unciformien 18** et **pisi-métacarpien 19** ; ce dernier participe à l'articulation carpo-métacarpienne.

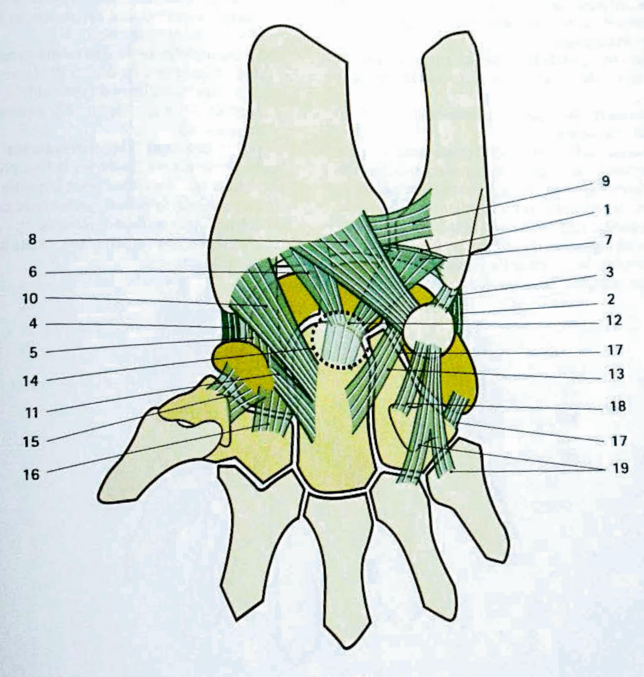


Fig. 28

Sur une **vue postérieure** (Fig. 29), on retrouve :

- Le **ligament latéral externe de la radio-carpienne**, par son faisceau postérieur **4** ;
- Le **ligament latéral interne de la radio-carpienne**, lui aussi par son faisceau postérieur **2**, dont les insertions sont intriquées avec le sommet du ligament triangulaire **1** ;
- Le **ligament postérieur de la radio-carpienne** constitué de deux faisceaux obliques en bas et en dedans ;
- Le **faisceau radio-lunarien postérieur 20**, ou frein postérieur du lunaire ;
- Le **faisceau radio-pyramidal postérieur 21** dont les insertions sont à peu près symétriques à celles de son homologue antérieur, y compris son intrication avec la terminaison du ligament postérieur de la radio-cubitale inférieure **22** sur le bord postérieur de la cavité sigmoïde du radius : ce faisceau postérieur complète la « fronde du pyramidal » ;
- Les deux sangles transversales postérieures du carpe :
  - La **bandelette de la première rangée 23**, tendue transversalement de la face postérieure du pyramidal **25** à celle du scaphoïde **24**, prenant une insertion de relais sur la corne postérieure du lunaire et envoyant une expansion au ligament latéral externe et une expansion au ligament radio-pyramidal postérieur ;
  - La **bandelette de la deuxième rangée 26** étendue obliquement en dehors et légèrement en bas de la face postérieure du pyramidal à celle du trapézoïde **28** et du trapèze **27**, passant en arrière du grand os.
- Enfin, le **ligament triquetro-hamatal 30**, dont la partie postérieure s'insère sur la face postérieure du pyramidal qui joue ainsi pour la partie postérieure du carpe le rôle de relais ligamentaire dévolu au col du grand os sur sa face antérieure ;
- Et le **ligament postérieur scapho-trapézo-trapézoïde** 29.

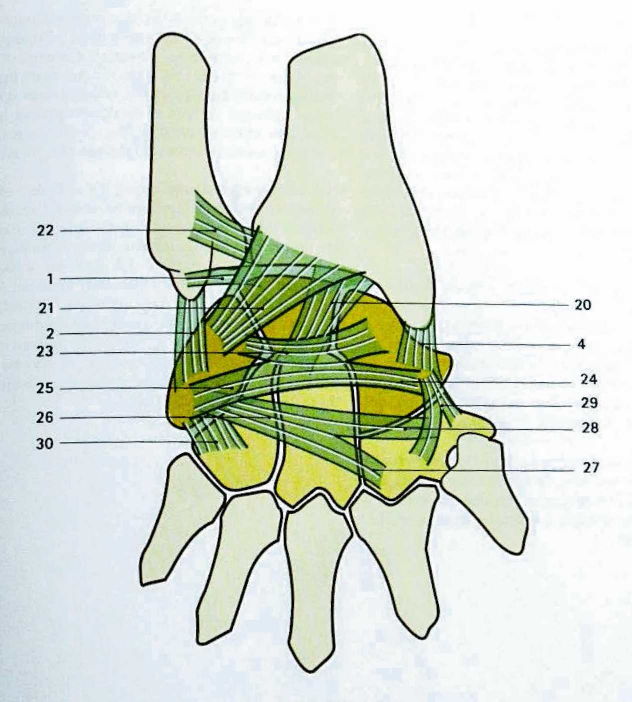


Fig. 29

Rôle stabilisateur des ligaments

Stabilisation dans le plan frontal

Le premier rôle des ligaments du poignet est de stabiliser le carpe dans les deux plans frontal et sagittal.

Dans le plan frontal (Fig. 30, vue schématique de face), le rôle des ligaments est rendu nécessaire par l'orientation de la glène antibrachiale qui est orientée en bas et en dedans, de telle sorte que dans son ensemble elle puisse être assimilée à un plan oblique de haut en bas et de dedans en dehors, formant avec l'horizontale un angle de 25 à 30°. Sous la pression des forces musculaires longitudinales, le carpe en rectitude a ainsi **tendance à glisser en haut et en dedans**, dans le sens de la flèche rouge.

Par contre, (Fig. 31) si le carpe est porté **en adduction** aux alentours de 30°, la force de compression (flèche blanche) d'origine musculaire s'applique perpendiculairement au plan de glissement précédemment défini, ce qui stabilise et recentre le condyle carpien sous la glène. Or, cette position en légère adduction est la position naturelle du poignet, la position de fonction, qui coïncide donc avec sa stabilité maximum.

Inversement (Fig. 32), lorsque le carpe est porté **en abduction**, *si* faible soit elle, la compression d'origine musculaire accroît l'instabilité et entraîne une tendance au déplacement du condyle carpien en haut et en dedans (flèche rouge).

Les ligaments latéraux de la radio-carpienne ne sont guère aptes à enrayer ce mouvement en raison de leur direction longitudinale. Comme l'a montré N. Kuhlmann, ce rôle est dévolu (Fig. 33) aux **deux ligaments radio-pyramidaux antérieur et postérieur** dont la direction oblique en haut et en dehors permet le recentrage permanent du condyle carpien (flèche blanche) et s'oppose à son échappée en dedans (flèche rouge).

Sur une **vue postéro-interne** (Fig. 34) de l'extrémité inférieure du radius, après avoir enlevé l'extrémité inférieure du cubitus, ce qui laisse voir la cavité sigmoïde du radius **1** et le pyramidal **2**, flanqué du pisiforme **3** – les autres os du carpe ayant aussi été enlevés – on voit que le pyramidal est relié au radius par les deux ligaments radio-pyramidaux antérieur **4** et postérieur **5**. Ils constituent ensemble une **fronde ligamentaire** qui ramène en permanence le pyramidal en haut et en dedans. Cette fronde du pyramidal joue, comme nous le verrons plus loin, un rôle important dans la mécanique du carpe lors de l'abduction.

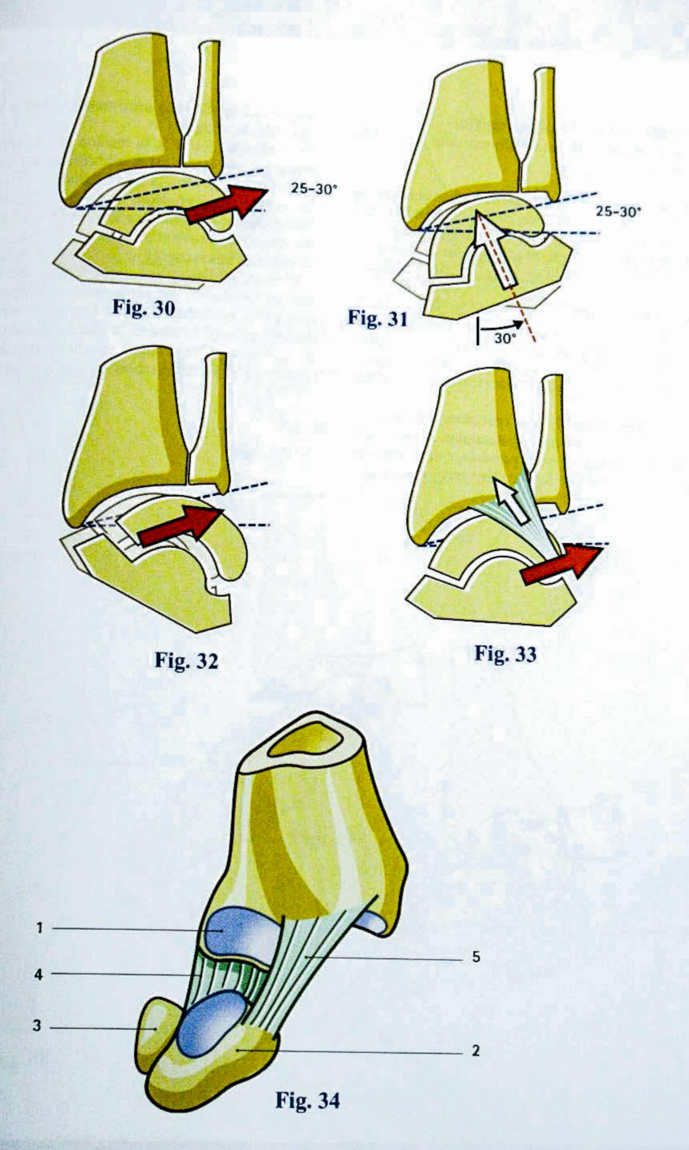


Fig. 30

Fig. 31

Fig. 32

Fig. 33

Fig. 34

Stabilisation dans le plan sagittal

Dans le plan sagittal, les conditions sont à peu près les mêmes.

Du fait de **l'orientation de la glène en bas et en avant** (Fig. 34 : vue schématique de profil), le condyle carpien a tendance à fuir en haut et en avant, dans la direction de la flèche rouge, en glissant sur le plan de la glène qui forme un angle de 20 à 25° sur l'horizontale.
La **flexion du poignet** de 30 à 40° (Fig. 35) oriente la poussée osseuse, sous la pression des forces musculaires (flèches rouges), perpendiculairement au plan de la glène, ce qui stabilise et recentre le condyle carpien. Une légère flexion du poignet correspond à la **position de fonction**.
Le **rôle des ligaments** (Fig. 36) est alors relativement réduit : les ligaments antérieurs, détendus, n'interviennent pas ; par contre, le frein postérieur du lunaire et la sangle transversale de la première rangée sont tendus, ce qui applique le semi-lunaire sous la glène radiale (flèche rouge).
En **rectitude** (Fig. 37), la tension des ligaments postérieurs et antérieurs est équilibrée, ce qui stabilise le condyle carpien sous la glène radiale.
Par contre, en **extension** (Fig. 38), la tendance à l'échappée du condyle carpien en haut et en avant (flèche rouge) se trouve renforcée.
Le **rôle des ligaments** (Fig. 39) est alors essentiel, non pas tant des ligaments postérieurs, qui sont détendus, que des antérieurs, dont la tension est proportionnelle au degré d'extension. Par leur face profonde, ils compriment la semi-lunaire et la tête du grand os en haut et en arrière (flèche rouge), ce qui produit à la fois le recentrage et la stabilisation du condyle carpien.

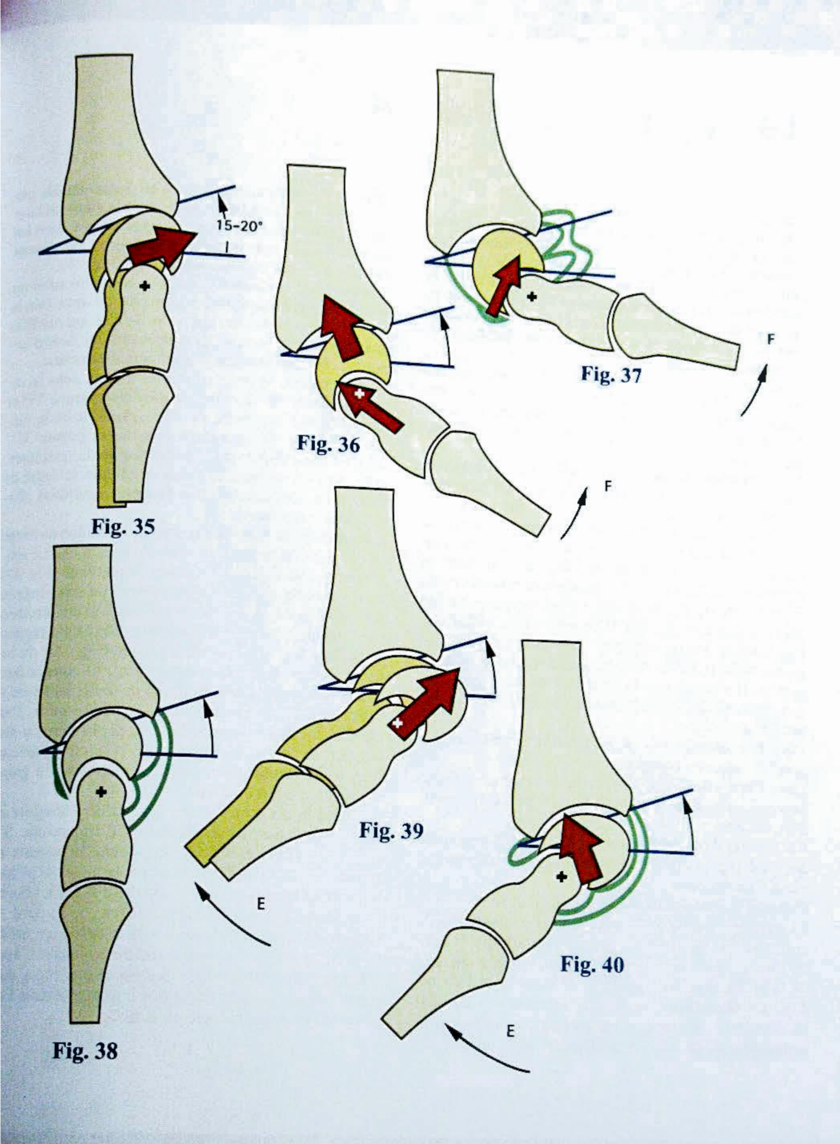


Fig. 35

Fig. 36

Fig. 37

Fig. 38

Fig. 39

Fig. 40

La dynamique du carpe

Colonne du semi-lunaire

On sait maintenant que le massif carpien n'est pas un bloc immuable : cette conception monolithique ne correspond plus à la réalité. En réalité, il faut raisonner avec un **carpe à géométrie variable** dans lequel, sous l'action des **pressions osseuses** et des **résistances ligamentaires** se produisent des **mouvements relatifs des os** à l'intérieur du carpe qui modifient sensiblement sa forme.

Ces mouvements élémentaires ont été fort bien étudiés par N. Kuhlmann, essentiellement au niveau de la **colonne médiane** du semi-lunaire et du grand os, et de la **colonne externe** du scaphoïde avec le couple trapèze, trapézoïde.

La dynamique de la colonne médiane dépend de la forme asymétrique du semi-lunaire, qui est plus renflé, plus épais en avant qu'en arrière : suivant les cas, la tête du grand os est coiffée d'un bonnet phrygien (Fig. 41), d'une toque de cosaque (Fig. 42) ou d'un turban (Fig. 43) ; il est rare qu'elle porte un bicorne « premier empire » (Fig. 44) symétrique et dans ce cas, c'est la tête du grand os qui est asymétrique, taillée plus obliquement en avant. Dans près de la moitié des cas, c'est le bonnet phrygien qui s'interpose entre le grand os et la glène radiale, à la manière d'un coin courbe. Il s'ensuit que la distance utile tête du grand os/glène radiale varie suivant le degré de flexion-extension du poignet.

Dans **la rectitude** (Fig. 45), la **distance utile** correspond à l'épaisseur moyenne du semi-lunaire.

Dans **l'extension** (Fig. 46), cette distance utile diminue puisqu'elle correspond à la plus petite épaisseur du semi-lunaire.

Par contre, **dans la flexion** (Fig. 47), elle augmente car c'est la plus grande épaisseur du coin lunarien qui vient s'interposer.

Cependant, **l'obliquité de la glène** vient se combiner à cette variation de la distance utile, ce qui en annule en partie les effets : ainsi, c'est en rectitude que le centre de la tête du grand os est le plus éloigné du fond de la glène, dans le sens de l'axe longitudinal du radius. **En extension** (Fig. 46), la «remontée » du centre de la tête du grand os est en partie annulée par la « descente » du rebord postérieur de la glène. **En flexion** (Fig. 47), sa descente est en partie annulée par la « remontée » du rebord antérieur de la glène. Si bien que le centre de la tête du grand os se trouve, dans les deux cas, à peu près à la même hauteur **h**, légèrement au-dessus de sa position en rectitude (Fig. 45).

D'autre part, **en flexion** (Fig. 47), ce centre subit un **déplacement antérieur a** égal à plus de deux fois le recul **r** associé à l'extension (Fig. 46), ce qui modifie de façon inverse le degré de tension et le moment d'action des fléchisseurs par rapport aux extenseurs.

Classiquement, la flexion est plus grande dans la radio-carpienne **50°** que dans la médio-carpienne 35° et inversement l'extension est plus grande dans la médio-carpienne **50°** que dans la radio-carpienne 35°. Ceci est assurément vrai pour les amplitudes extrêmes, mais dans les secteurs de faible amplitude, le degré de flexion ou d'extension est à peu près égal dans chacune des articulations.

L'**asymétrie du semi-lunaire** rend la statique du carpe très sensible à sa position relative dans la chaîne articulaire. Si, partant de la position de rectitude (Fig. 48) correspondant à un arrimage normal du semi-lunaire par ses deux freins antérieur et postérieur, on introduit, sans aucune flexion-extension du grand os par rapport au radius, soit une bascule en avant (Fig. 49) du lunaire, soit une bascule en arrière (Fig. 50), on constate que le centre de la tête du grand os se déplace vers le haut **e** et respectivement l'arrière **c** ou l'avant **b** : l'instabilité localisée du semi-lunaire, par rupture ou distension du frein antérieur (Fig. 42) ou postérieur (Fig. 43), retentit ainsi, par l'intermédiaire du grand os, sur la totalité du carpe.

La stabilité du semi-lunaire dépend de l'intégrité de ses liaisons avec le scaphoïde et le triquetrum. S'il perd sa connexion avec le scaphoïde, il **bascule en avant** (Fig. 51) par extension dans la radio-carpienne. C'est ce que les Américains appellent **D.I.S.I.** (*Dorsal Intercalated Segment Instability*). S'il perd sa connexion avec le *triquetrum*, il bascule en arrière (Fig. 52) par flexion dans la radio-carpienne : c'est la **V.I.S.I.** (*Volar Intercalated Segment Instability*), deux termes devenus maintenant très importants dans l'explication de la pathologie du carpe.

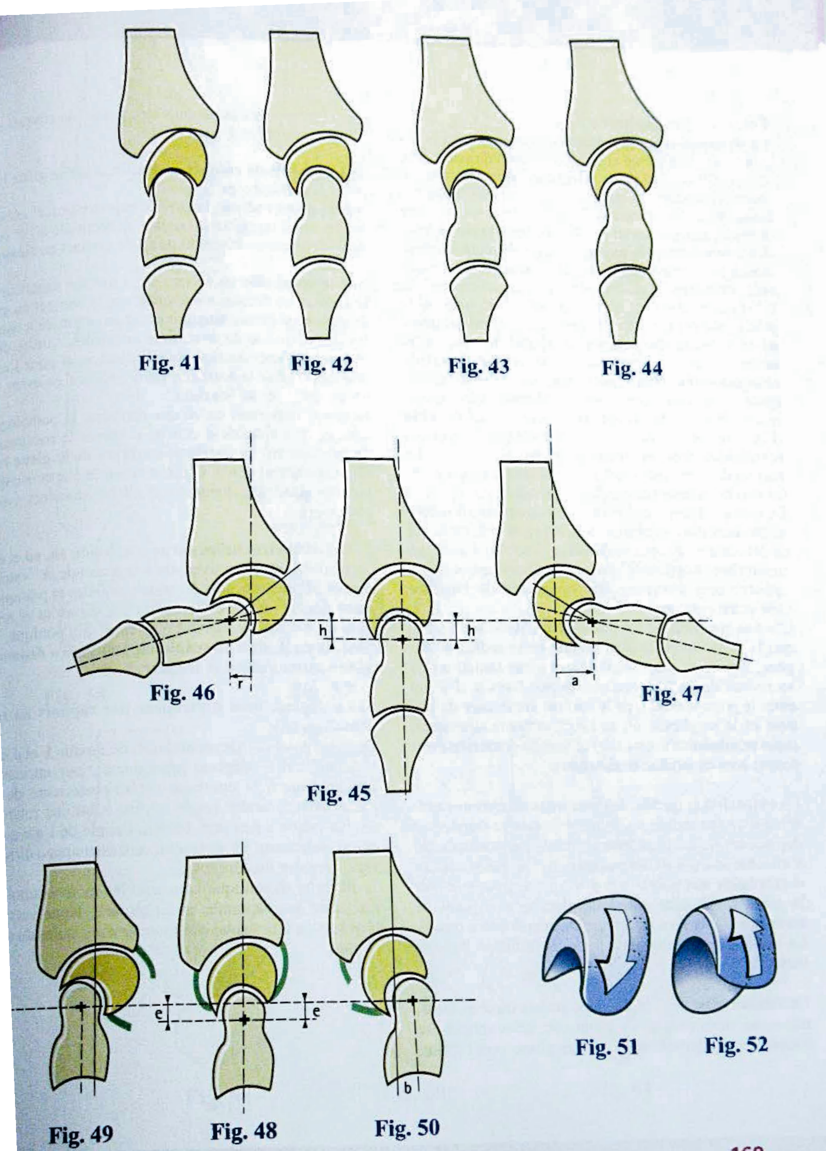


Fig. 41 Fig. 42 Fig. 43 Fig. 44

Fig. 46 Fig. 45 Fig. 47

Fig. 49 Fig. 48 Fig. 50

Fig. 51 Fig. 52

Colonne du scaphoïde

La dynamique de la colonne externe est sous la dépendance de la forme et de l'orientation du scaphoïde. De profil (Fig. 53), le scaphoïde possède une silhouette réniforme, ou encore en haricot, la partie haute, arrondie, correspondant à la surface supérieure convexe, articulée avec la glène radiale, la partie inférieure représentant le renflement du tubercule scaphoïdien à la face inférieure duquel s'articulent le trapézoïde et le trapèze, seul ce dernier a été ici représenté. Il est situé nettement plus en avant que le trapézoïde et le grand os, car **avec lui commence l'antéposition de la colonne du pouce** par rapport au plan de la paume. Ainsi, le scaphoïde se trouve-t-il **intercalé obliquement entre radius et trapèze**, mais cette obliquité est plus ou moins marquée suivant sa forme. On reconnaît ainsi des **scaphoïdes réniformes couchés** (Fig. 53), des scaphoïdes coudés assis (Fig. 54) et des **scaphoïdes presque droits « debout »** (Fig. 55). Le scaphoïde « couché » étant le plus fréquent, c'est celui que nous représenterons sur les schémas.

La forme allongée du scaphoïde permet de lui reconnaître deux diamètres (Fig. 56), le grand et le petit, qui se présentent, suivant la position, l'un ou l'autre en contact avec la glène radiale et la facette supérieure du trapèze; ceci détermine les **variations de l'espace** utile entre ces deux os.

C'est en **position neutre**, ou « de rectitude » (Fig. 57) que la distance est la plus grande entre radius et trapèze; le contact entre scaphoïde et glène radiale a lieu au niveau des deux points correspondants **a** et **a'**, et entre le point central **g** de la surface supérieure du trapèze et le scaphoïde en **b**. Les ligaments antérieurs, radio scaphoïdien (vert clair) et scapho-trapézien (vert foncé) sont ni tendus, ni détendus.

En **extension** (Fig. 58), la distance utile diminue tandis que le scaphoïde se redresse et que le trapèze se déplace en arrière; le contact entre glène et scaphoïde s'effectue aux points homologues **c c'**, et entre trapèze et scaphoïde aux points **d et g**. Le point de contact sur la glène **c'** est plus antérieur, alors que le point de contact **d** sur la face inférieure du scaphoïde a reculé. La tension des ligaments antérieurs limite le mouvement.

En **flexion** (Fig. 59), la distance radius-trapèze diminue aussi, mais plus qu'en extension. Le scaphoïde se couche complètement et le trapèze glisse vers l'avant.

Ceci amène trois remarques (les points de contact se situent en **e**, **e'** et **f**, **g**):

1) **Les points de contact** se déplacent sur la glène radiale et le scaphoïde (Fig. 60):
Sur la glène radiale, le contact en extension **c'** est situé en avant du point de contact en rectitude **a'**, et ces deux derniers en avant du point de contact en flexion **e'**;
Sur le scaphoïde au niveau de la surface supérieure, le contact en flexion **e** est antérieur, le contact en extension **c** est postérieur, le contact en rectitude **a** entre les deux; niveau de la surface inférieure, l'ordre des points correspondants **f** pour la flexion, **d** pour l'extension, **b** pour la rectitude est le même **f** en avant, **d** en arrière, **b** entre les deux;
Le point important en ce qui concerne la pathologie est que le scaphoïde « couché » exerce le maximum de pression **sur la partie postérieure de la glène radiale** (points **a'** et **e'**). C'est le siège de l'arthrose débutante dans les disjonctions scapho-lunaires (voir plus loin).

2) **Les diamètres utiles sur le scaphoïde** **ab**, **cd** et **ef**, correspondant respectivement à la rectitude, à l'extension et à la flexion, sont presque parallèles et pratiquement égaux – **cd** et **ef** sont parallèles, - **ab** et ef sont égaux, **cd** étant légèrement plus court. En pratique, **la bascule en flexion du scaphoïde réduit la « distance utile » entre radius et trapèze.**

3) **Le déplacement du trapèze par rapport au radius** (Fig. 61)
Dans les positions de rectitude **R**, de flexion **F** et d'extension **E**, il se déplace pratiquement sur un cercle concentrique à la courbure antéro-postérieure de la glène radiale, tandis que le trapèze subit une rotation sur lui-même à peu près égale à l'angle de l'arc qu'il décrit, autrement dit sa facette supérieure reste dirigée vers le centre du cercle **C**.
Toute cette dynamique concerne les mouvements simultanés du scaphoïde et du trapèze. Nous verrons plus loin ce qui résulte des mouvements isolés du scaphoïde.

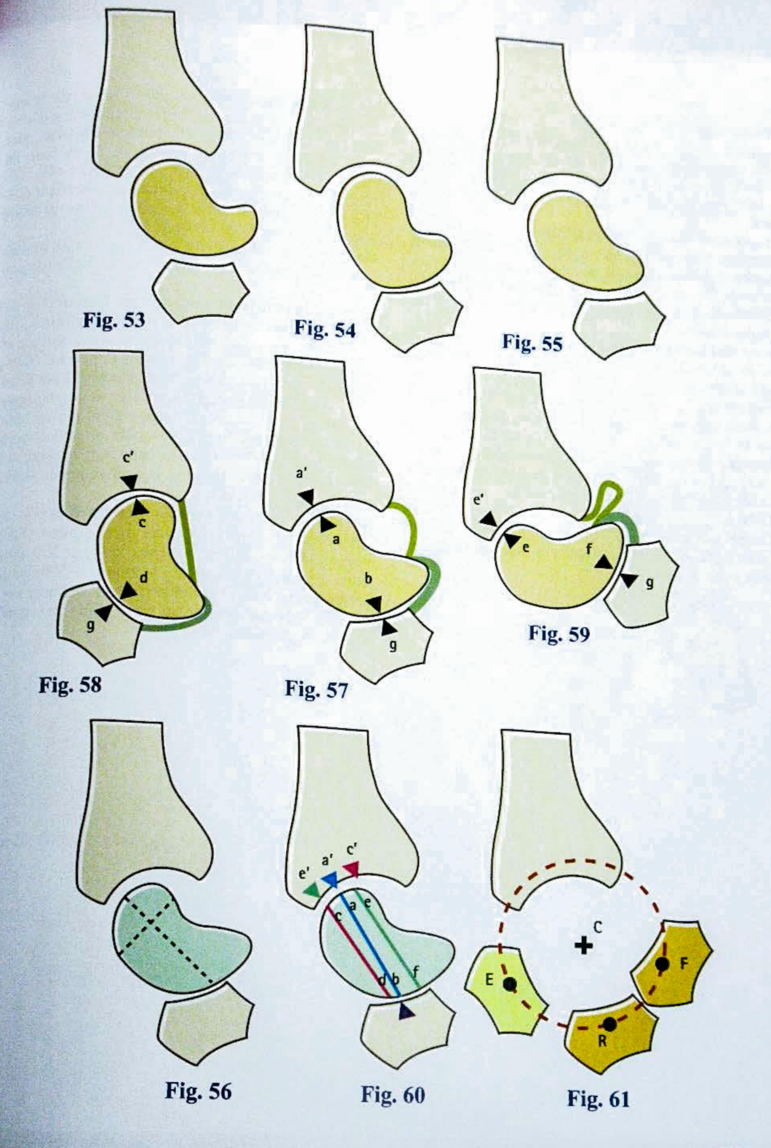


Fig. 53

Fig. 54

Fig. 55

Fig. 58

Fig. 57

Fig. 59

Fig. 56

Fig. 60

Fig. 61

Dynamique du scaphoïde

Intercalé au sein de la colonne externe, le scaphoïde subit une compression entre le trapèze et le trapézoïde d'une part, et la glène radiale d'autre part, qui tend à la faire basculer en flexion, **à le coucher sous le radius**.

Le **premier facteur de stabilité** (Fig. 62) est son amarrage ligamentaire au trapèze, grâce au **ligament scapho-trapézien** auquel on accorde une grande importance, au trapézoïde, par le **ligament scapho-trapézoïdien**, et au *capitatum* (grand os) par le **ligament scapho-capital**.

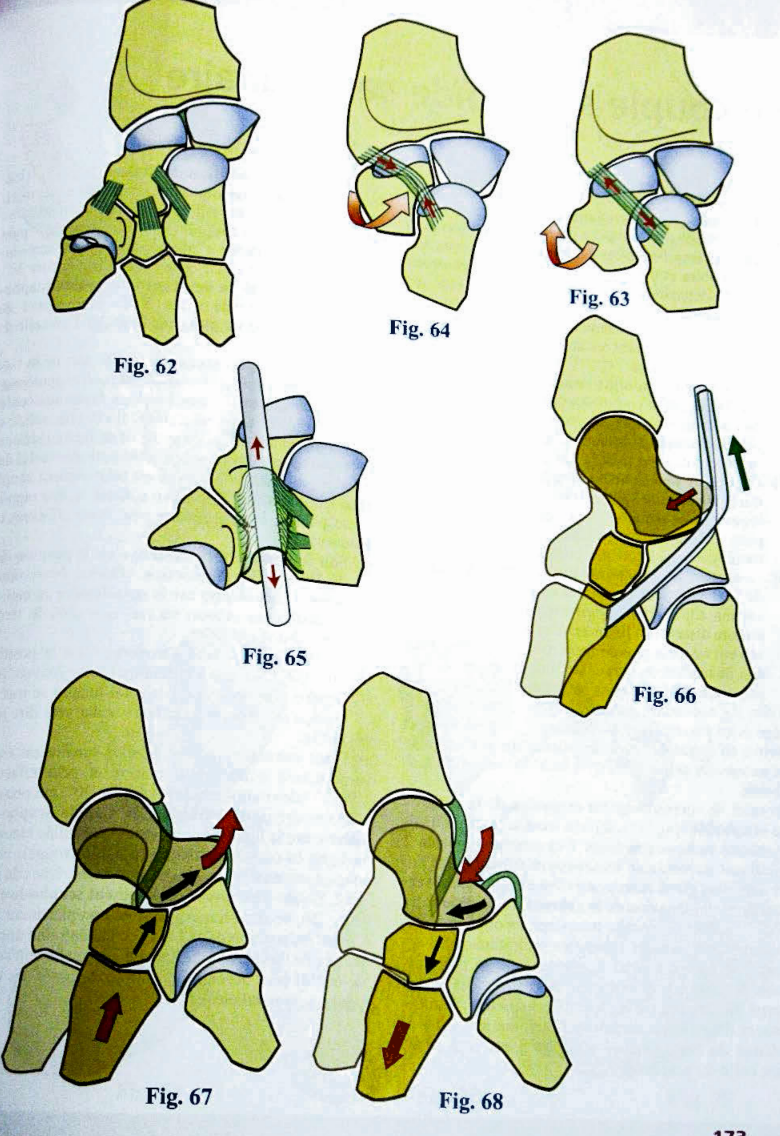
Le **second facteur de stabilité** (Fig. 63) est constitué par le solide ligament radio-capital, qui s'étend du bord antérieur de la styloïde radiale au centre de convergence ligamentaire à la face antérieure du grand os. Dans ce trajet, oblique en bas et en dedans, il *cravate* la face antérieure du scaphoïde, au niveau d'une dépression située entre la surface articulaire supérieure et son tubercule. Par sa mise en tension, ce ligament ramène le pôle inférieur du scaphoïde vers l'arrière (flèche). Mieux encore (Fig. 64 : vue de face), lorsque le scaphoïde a tendance à se coucher en flexion sous le radius (flèche), c'est le ligament radio-capitale qui limite cette bascule.

Un **troisième facteur** est constitué (Fig. 65) par le tendon du *palmaris longus* (grand palmaire) qui glisse en avant du scaphoïde dans une **coulisse fibreuse**, pour venir se fixer à la face antérieure de la base du deuxième métacarpien. Une vue de profil (Fig. 66) montre parfaitement l'effet de rappel postérieur (flèche rouge) qu'effectue le tendon du grand palmaire lorsqu'il se contracte (flèche bleue).

On peut donc schématiser le mouvement de bascule du scaphoïde de la façon suivante sur des vues de profil.

Lorsque le scaphoïde se couche en flexion (Fig. 67) sous la poussée des deux premiers métacarpiens (flèche rouge) son pôle inférieur glisse sur la surface articulaire supérieure du trapèze et du trapézoïde (flèche rouge incurvée) ; le mouvement est contrôlé par la tension des ligaments scapho-trapézien et scapho-trapézoïdien et par le ligament radio-capital (vu en transparence). Simultanément, son pôle proximal tourne sous la glène radiale et vient buter sur la marge postérieure de la glène. De plus, la contraction du *palmaris longus* le ramène en arrière.

Lorsque la colonne externe est en traction (Fig. 68) exercée par les deux premiers métacarpiens (flèche rouge), le scaphoïde se redresse, aidé par la contraction du *palmaris longus* qui s'oppose à l'élongation, tandis que sa base glisse en arrière sur le trapèze et le trapézoïde et que son pôle proximal réintègre la concavité de la glène radiale.


Fig. 62
Fig. 64
Fig. 63
Fig. 65
Fig. 66
Fig. 67
Fig. 68

Le couple scaphoïde semi-lunaire

Dans les mouvements de flexion extension du poignet, N. Kuhlmann distingue quatre secteurs (Fig. 69) :

1) Le **secteur d'adaptation permanente I** jusqu'à 20° : les amplitudes des déplacements élémentaires sont faibles et difficiles à apprécier ; les ligaments restent détendus et la pression sur les surfaces articulaires est minime. C'est dans ce secteur que s'effectuent les mouvements les plus courants et qu'il faut absolument restaurer après une opération ou un traumatisme ;
2) Le **secteur de mobilité usuelle II** jusqu'à 40° : le jeu ligamentaire commence à se faire sentir et les pressions articulaires à devenir notables. Jusqu'à ce point, les amplitudes dans la radio et la médio-carpienne sont à peu près égales ;
3) Le **secteur de contrainte physiologique momentanée III** jusqu'à 80° : les tensions ligamentaires et les pressions articulaires atteignent leur maximum pour réaliser en fin de course la position de verrouillage ou *close packed position* de Mac Conaill ;
4) Le **secteur de contrainte pathologique** au-dessus de 80° : à partir de ce point la continuation du mouvement entraîne obligatoirement soit une **rupture ou une distension ligamentaire** qui va malheureusement rester le plus souvent méconnue, entraînant une instabilité du carpe, soit une **fracture ou une luxation** ainsi que nous le verrons plus loin.

S'il a été nécessaire de revenir à ces notions de blocage et de verrouillage articulaire, c'est pour pouvoir mettre en lumière **l'asynchronisme du verrouillage en extension** des colonnes du semi-lunaire et du scaphoïde.

En effet, le **verrouillage en extension de la colonne du scaphoïde** (Fig. 71), dû à la tension maximum des ligaments radio-scaphoïdien **1** et scapho-trapézien **2** entraînant un véritable enclavement du scaphoïde entre trapèze et glène radiale, survient plus tôt que le **verrouillage en extension de la colonne du semi-lunaire** (Fig. 70) : dans ce blocage intervient, en effet, non seulement la tension des ligaments radio-lunarien antérieur **3** et lunaro-capital **4**, mais encore la *butée osseuse* de la face postérieure du col du grand os sur la marge postérieure de la glène (flèche noire) ; le mouvement d'extension se poursuit donc au niveau de la colonne du semi-lunaire, alors qu'il est déjà arrêté dans celle du scaphoïde.

Si l'on part de la **position de flexion** (Fig. 72, vue de profil du semi-lunaire et du scaphoïde ensemble), dans un premier temps (Fig. 73) l'extension entraîne simultanément scaphoïde et semi-lunaire, puis (Fig. 75) le scaphoïde s'arrête tandis que le semi-lunaire continue sa bascule en avant pendant encore 30°, grâce à l'**élasticité du ligament interosseux scapho-lunarien**. L'amplitude totale **S** du mouvement du semi-lunaire est donc plus grande de 30° que celle du scaphoïde **s**.

Ce **ligament scapho-lunaire** (Fig. 76 : vue de la face interne du scaphoïde), figuré ici en rose exagérément étiré et transparent **L**, unit les deux faces adjacentes du scaphoïde et du semi-lunaire ; il est plus solide et plus épais en arrière qu'en avant, et sa face supérieure est recouverte de cartilage en continuité avec celui des deux os voisins. Ce ligament est relativement souple et se laisse tordre (Fig. 76) sur son axe **X**. Par rapport au scaphoïde, le semi-lunaire peut donc effectuer un mouvement :

- Soit de **bascule vers l'avant** : c'est la position dite de **D.I.S.I.** des Américains, (*Dorsal Intercalated Segment Instability*) car le semi-lunaire se met en extension par rapport au radius – d'où le terme d'instabilité *dorsale* ;
- Soit de **bascule vers l'arrière** : c'est la position dite de **V.I.S.I.** des Américains, (*Volar Intercalated Segment Instability*) car le semi-lunaire se met en flexion par rapport au radius – volar veut dire *palmaire*.

À l'**état normal** (Fig. 77), le semi-lunaire est *sagement* accolé contre le scaphoïde et peut effectuer (Fig. 78) des mouvements relatifs de 30°, qui peuvent s'apprécier par la **variation de l'angle scapho-lunaire** entre la ligne scaphoïdienne (pointillée bleue) et la ligne bi-corne lunarienne (pointillé rouge), angle mesuré entre la flexion et l'extension extrêmes du poignet. En cas de **rupture du ligament scapho-lunaire** (Fig. 79), le semi-lunaire bascule complètement vers l'avant en position de **D.I.S.I.**, ce qui entraîne une fermeture de l'angle scapho-lunaire : normalement voisin de 60°, il peut devenir nul (sur cette figure, les deux lignes sont parallèles).

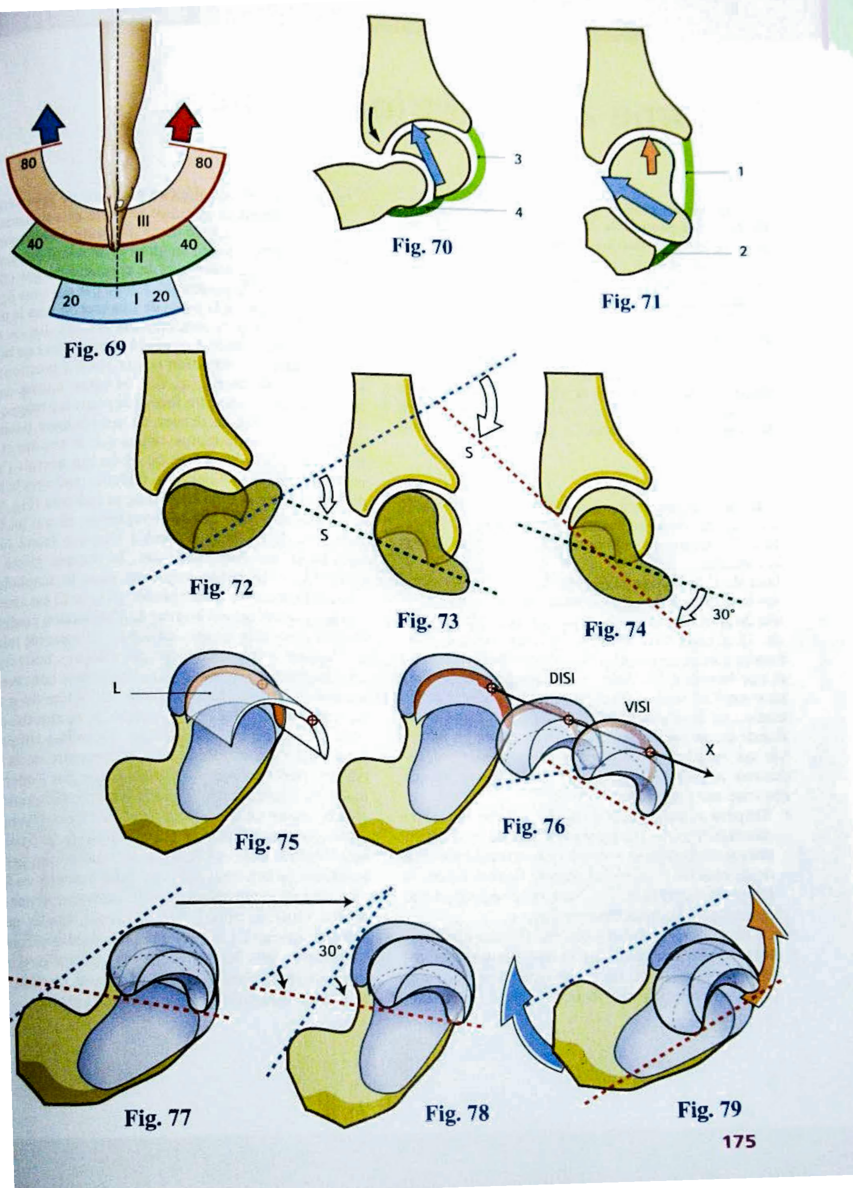


Fig. 69

Fig. 70

Fig. 71

Fig. 72

Fig. 73

Fig. 74

Fig. 75

Fig. 76

Fig. 77

Fig. 78

Fig. 79

Le carpe à géométrie variable

Le carpe est un assemblage de **huit os, dont sept participent à la géométrie** de ce qu'il est convenu d'appeler le **Massif Carpien**. Depuis une trentaine d'années, le carpe n'est plus un ensemble monolithique : on connaît maintenant les mouvements élémentaires complexes qui affectent sa structure. Le carpe peut être considéré comme un **sac de noix** (Fig. 80) se déformant sous les contraintes au cours des mouvements du poignet. Mais ces déplacements ne sont pas aléatoires, comme avec de vraies noix ; ils sont **ordonnés et logiques** du fait de la **forme de chacun des os**, qui a été modelée sous l'action des mouvements, et aussi du **fait des ligaments** qui relient ces os et orientent leurs mouvements.

L'abduction-adduction

C'est lors des mouvements d'abduction-adduction que les modifications de forme sont les plus évidentes. L'étude attentive des radiographies de face permet de le constater.

Lors de l'**abduction** (Fig. 81), le carpe tourne dans son ensemble autour d'un centre situé au niveau de la tête du grand os, la rangée supérieure se déplaçant (flèche **1**) en haut et en dedans de telle sorte que le semi-lunaire vienne se placer à moitié sous la tête cubitale et que le pyramidal, dans sa descente, accroisse l'espace qui l'en sépare. Ce déplacement est arrêté par la tension du ligament latéral interne **I** et surtout de la fronde du pyramidal **F**, transformant cet os en un butoir sur lequel vient se bloquer le semi-lunaire. L'abduction se poursuivant, seule la deuxième rangée continue son mouvement :

- **Trapèze** et **trapézoïde** s'élèvent (flèche **2**), ce qui diminue l'espace utile entre trapèze et radius ; coincé entre trapèze **2** et radius **3**, le scaphoïde perd de sa hauteur en se couchant par flexion **f** dans la radio-carpienne (Fig. 83), tandis que se produit une extension dans la médio-carpienne **e** ;
- Le ***capitatum*** (grand os) descend (flèche **4**), ce qui accroît l'espace utile offert au **semi-lunaire** qui, retenu par son frein antérieur, peut ainsi basculer (Fig. 84) en arrière par flexion f dans la radio-carpienne, présentant alors sa plus grande épaisseur ; simultanément, le grand os se porte en extension e dans la médio-carpienne ; la diminution de hauteur du scaphoïde autorise un glissement relatif du grand os et de l'os crochu sous la première rangée (flèches noires) : le pyramidal, retenu par ses trois ligaments, monte sur la pente de l'os crochu vers la tête du grand os. Les mouvements relatifs des os du carpe étant épuisés, l'ensemble forme alors un **bloc verrouillé en abduction** (*close-packed position*).

Lors de l'**adduction** (Fig. 82), le carpe tourne dans son ensemble, mais cette fois-ci la première rangée se déplace en bas et en dehors, le semi-lunaire passant entièrement sous le radius, tandis que le trapèze et le trapézoïde s'abaissent (flèche **1**) ce qui accroît l'espace utile laissé au scaphoïde. Celui-ci, tiré vers le bas par le ligament scapho-trapézien, se redresse (Fig. 86) en extension **e** dans la radio-carpienne, ce qui lui fait gagner de la hauteur et comble l'espace laissé libre sous le radius. Simultanément, le trapèze glisse en flexion **f** de la médio-carpienne sous le scaphoïde ; lorsque la descente du scaphoïde (flèche **2**) est arrêtée par le ligament latéral externe **E**, l'abduction continue dans la deuxième rangée, créant un glissement relatif par rapport à la première rangée (flèches noires) : la tête du grand os s'enfonce sous la surface concave du scaphoïde, le semi-lunaire glisse sur la tête du grand os venant au contact de l'os crochu, le pyramidal descend sur la pente de l'os crochu. En même temps, le pyramidal s'élève (flèche **3**) à la rencontre de la tête cubitale (flèche **4**) qui forme une butée, par l'intermédiaire du ligament triangulaire, transmettant ainsi les efforts venant de l'avant-bras vers les deux rayons internes de la main ; le grand os s'élève (flèche **5**) réduisant l'espace utile offert au semi-lunaire, qui, grâce à la détente de son frein antérieur peut basculer en avant (Fig. 87) en extension **e** dans la radio-carpienne présentant ainsi sa plus faible épaisseur, tandis que le grand os se met en flexion **f** dans la médio-carpienne. Là encore, tous les mouvements relatifs des os du carpe étant épuisés, l'ensemble forme un **bloc verrouillé en adduction** (*close packed position*).

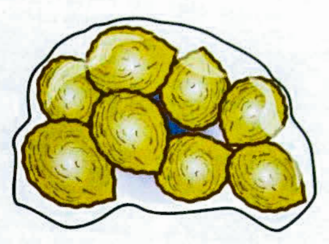
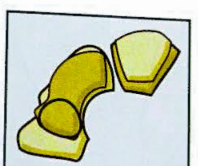


Fig. 80



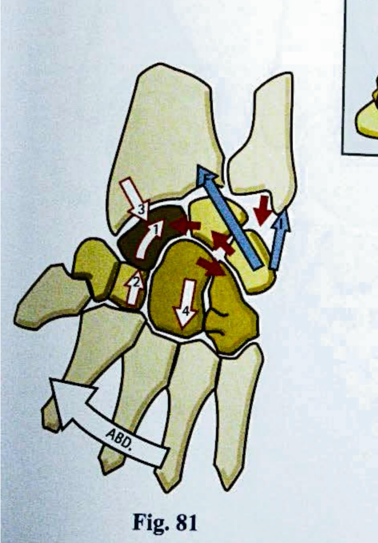


Fig. 81

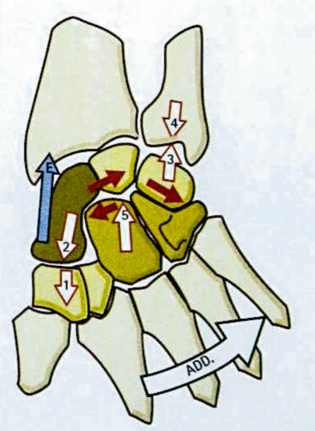


Fig. 82

Dynamique de la rangée proximale

Si l'on compare (schéma en cartouche) le couple scaphoïde semi-lunaire en abduction (foncé) et en adduction (clair), on constate que chacun des os subit une transformation opposée : en abduction, le scaphoïde diminue et présente un anneau (le *ring* des Américains) sur la radio, et le semi-lunaire augmente de surface : en adduction, c'est l'inverse. Cette métamorphose est due aux mouvements de flexion-extension dans les deux articulations du carpe :

- **En abduction** (Fig. 83 et 84), la flexion dans la radio-carpienne est annulée par l'extension dans la médio-carpienne ;
- **En adduction** (Fig. 85 et 86), inversement, l'extension dans la radio-carpienne est compensée par la flexion dans la médio-carpienne.

En toute logique et réciproquement, on peut dire que :

- La **flexion du poignet** s'accompagne d'une **abduction dans la radio-carpienne et d'une adduction dans la médio-carpienne** ;
- L'**extension du poignet** implique une **adduction dans la radio-carpienne et une abduction dans la médio-carpienne**.

Ainsi se trouve confirmé le mécanisme décrit par Henke.

En ce qui concerne la forme et la position du **pôle supérieur de l'*hamatum*** (os crochu), des études radiologiques statistiques ont établi que la plupart du temps (71 %) cet os présente une petite facette en contact permanent avec le lunatum (Fig. 87), transmettant mieux les pressions, alors que dans une minorité de cas (29 %), son pôle supérieur est aigu (Fig. 88), ne venant au contact du *lunatum* que lors de l'adduction.

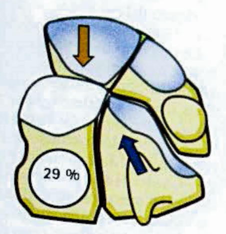


Fig. 88

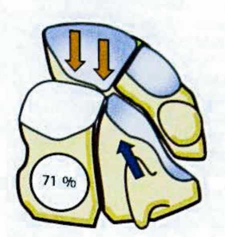


Fig. 87

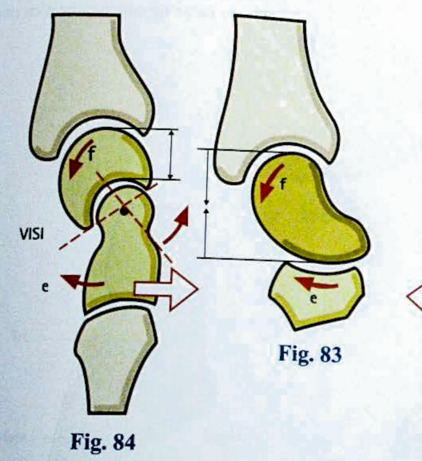


Fig. 84

Fig. 83

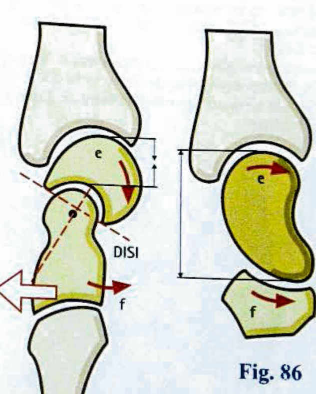


Fig. 85

Fig. 86

Le segment intercalé

La rangée supérieure ou rangée proximale des os du carpe jouit d'une mobilité plus grande que la rangée distale, considérée comme pratiquement mono-bloc. En effet, elle est interposée entre la glène et la rangée distale, d'où le nom d'*Intercalated Segment* que lui donnent les auteurs anglophones. Cette rangée (Fig 89 : vue de face) sur laquelle ne s'insère aucun muscle, est donc soumise seulement à la pression que lui communiquent les deux segments voisins, maintenue uniquement par les ligaments interosseux. Considérée comme un tout, lorsqu'elle est comprimée entre la rangée distale et la glène radiale, ses trois os basculent en flexion. Ceci entraîne (Fig. 90 : vue de profil) la mise en tension des ligaments interosseux palmaires (double flèche jaune) et des ligaments radio-carpiens dorsaux (double flèche verte). En outre, étant réunis entre eux par les ligaments scapho-lunaire en dehors et triquetro-lunaire en dedans, ces trois os n'effectuent pas exactement le même mouvement de bascule :

- Le scaphoïde se couche plus que ne se fléchit le semi-lunaire, et effectue un léger mouvement de pronation (flèche verte) sur la tête du grand os (Fig. 89) ;
- Le *triquetrum* glisse en un mouvement hélicoïdal sur la facette supérieure de l'os crochu (*hamatum*) et effectue ainsi un léger mouvement de supination (flèche bleue).

Dans ce mouvement, le *triquetrum* est conduit par ses ligaments palmaires (Fig. 91) :

- La branche interne du V inférieur de Poirier, capito-triquetral **1** ;
- Le ligament triquetro-capital **2** ;
- Le ligament hamato-triquetral **3**.

Il reste essentiellement guidé par la **Fronde du Pyramidal** (Kuhlmann) dont on distingue :

- La lanière antérieure **4** et ;
- La postérieure **5** (le radius étant supposé enlevé).

Cette fronde lui permet ce mouvement de vissage (Fig. 92 : profil, le grand os étant supposé enlevé) sur l'*hamatum* **Ham**, comportant simultanément une flexion et une supination (flèche bleue).

Ce mouvement est encore plus net lors de l'adduction (Fig. 93), le *triquetrum* étant tiré en supination par ses ligaments palmaires, en particulier de la branche interne du V de Poirier (flèche noire). Simultanément, la distance entre tête ulnaire et *triquetrum* diminue – c'est la diminution de la distance utile du côté médial – de même que diminue l'espace laissé libre entre *triquetrum* et *hamatum* lors de l'inclinaison ulnaire. Au total, la hauteur du carpe du côté interne s'en trouve diminuée.

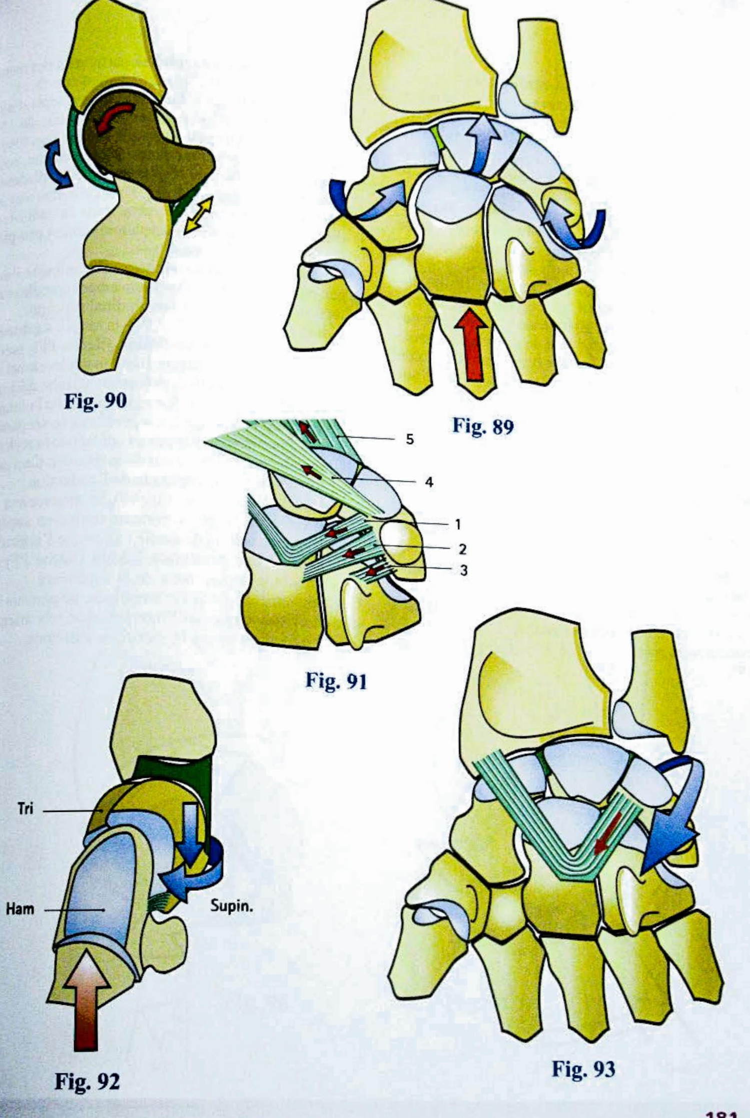


Fig. 90

Fig. 89

Fig. 91

Fig. 92

Fig. 93

Dynamique de l'adduction-abduction

Lors du **mouvement d'abduction** (Fig. 94), la radiographie de face montre que le massif carpien tourne sous la glène anté-brachiale autour d'un centre de rotation situé approximativement entre semi-lunaire et grand os (étoile) : le grand os s'incline en dehors, le semi-lunaire (plus foncé) se déplace en dedans, se situant juste sous l'articulation radio-ulnaire. Du côté externe, le scaphoïde bascule en flexion et perd de sa hauteur. Il se tasse sous le radius, et l'on voit apparaître **l'image en anneau** de son tubercule, le *ring* des anglophones. Cette rotation s'effectue en réalité autour d'un axe qui est évolutif : il se déplace légèrement, car on peut observer que, globalement, le carpe se déplace en dehors, jusqu'à ce que le scaphoïde vienne buter sur la styloïde radiale, plus basse que la styloïde ulnaire : donc l'abduction est limitée plus tôt que l'adduction. Du côté interne, le pyramidal s'écarte de 15 mm de la tête ulnaire. **L'amplitude du mouvement**, mesurée sur l'axe du 3e métacarpien, est de **15°**.
Lors du **mouvement d'adduction** (Fig. 95), le grand os s'incline en dedans et le semi-lunaire (plus foncé) se porte en dehors, se projetant ainsi entièrement sous le radius, dans la fossette lunarienne de la glène, tandis que le pyramidal monte presque au contact de l'ulna. Simultanément, le scaphoïde s'étire en extension, présentant sa plus grande hauteur, tandis que l'anneau disparaît. La partie proximale effilée de l'*hamatum* vient au contact du semi-lunaire ; le massif carpien reste bien centré sous le radius. L'amplitude de ce mouvement, mesurée sur le 3e métacarpien, est de **30-45°**.

L'articulation médio-carpienne participe à ces mouvements (Fig. 96 et 97 : vue schématique de face) :

- D'une part, elle est le siège de mouvements d'adduction-abduction : dans l'abduction totale de 15° elle interviendrait pour 8°, dans l'adduction totale de 45° elle interviendrait pour 15°, si bien que, pour Sterling Bunnel, son amplitude globale d'adduction-abduction serait de 23°. Pour ce même auteur, l'amplitude de ce mouvement dans la radio-carpienne et dans la médio-carpienne serait à peu près égale ;
- D'autre part, les deux rangées sont animées l'une par rapport à l'autre d'un mouvement complexe de torsion autour de l'axe longitudinal du carpe :
  - lors de l'abduction (Fig. 96), la rangée supérieure tourne en **pronation-flexion** (flèche PF), tandis que la rangée inférieure subit un déplacement inverse de **supination-extension** (flèche SE) qui équilibre le premier. Le mouvement de la rangée supérieure fait avancer légèrement le scaphoïde et lui permet d'échapper au contact de la styloïde radiale, ou tout au moins de le retarder. Ceci augmente un peu l'amplitude de l'abduction ;
  - lors de l'adduction (Fig. 97), le mouvement est inverse : la rangée supérieure tourne en **supination-extension** (flèche SE) alors que l'inférieure exécute une **pronation-flexion** (flèche PF) qui annule le déplacement de la supérieure.

Ces mouvements, de faible amplitude, ne peuvent être mis en évidence que par l'interprétation très attentive de radiographies prises en positions extrêmes.

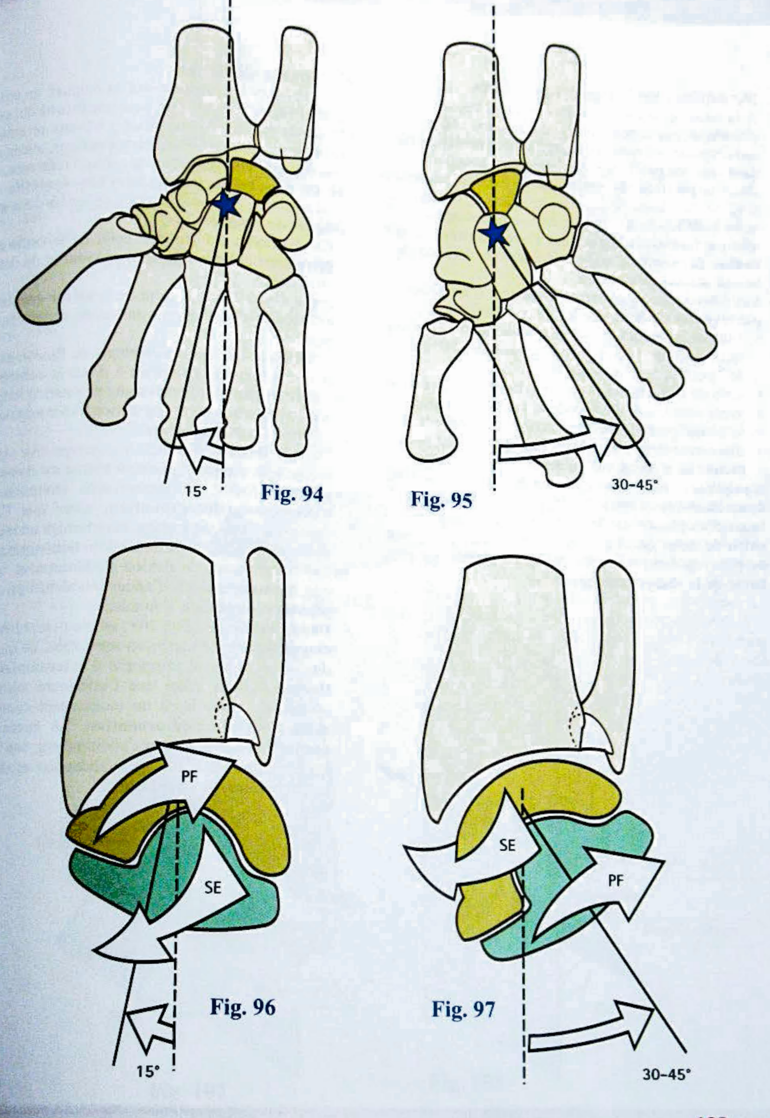


Fig. 94

Fig. 95

Fig. 96

Fig. 97

Dynamique de la flexion-extension

À la lumière de tout ce qui a été dit, il apparaît donc clairement que le fonctionnement des articulations radio-carpienne et médio-carpienne est **interdépendant** dans tous les types de mouvements du poignet.

Dans la **position de référence** de flexion-extension (Fig. 98 : schémas de profil) : le radius **1**, le semi-lunaire **2**, le capitatum **3**, et le troisième métacarpien **4** sont **parfaitement alignés sur l'axe longitudinal du radius**. Le rebord ou marge glénoïdienne descend plus bas en arrière qu'en avant.

Les deux schémas suivants permettent d'apprécier le **partage des tâches** entre les deux articulations :

- Lors de la **flexion** (Fig. 99), c'est la radio-carpienne qui développe la plus grande amplitude : 50° contre 35° pour la médio-carpienne ;
- Lors de l'**extension** (Fig. 100), la répartition est inverse sans doute à cause de la butée plus rapide de la marge postérieure du radius sur le carpe : la médio-carpienne s'étend de 50°, alors que la radio-carpienne ne s'étend que de 35°.

L'amplitude totale dans chacune des articulations est donc identique et égale à 85°, mais le sens du maximum d'amplitude est inversé. Pour s'en souvenir, il suffit de noter que l'extension de la radio-carpienne est plus rapidement limitée du fait de la situation plus basse de la marge postérieure.

Mécanisme de Henke

Pour expliquer les mouvements du poignet, un anatomiste allemand, Henke, a proposé une théorie qui semble devoir être confirmée par des travaux récents. Il faut se souvenir aussi qu'en biomécanique, aucun axe n'est contenu vraiment dans un plan de référence, aucun axe n'est stable, tous **les axes sont évolutifs**.

C'est ainsi (Fig. 101) que Henke a défini **les deux axes obliques du poignet** :

- **L'axe proximal 1** (rouge), celui de la **radio-carpienne** est oblique d'arrière en avant et de dehors en dedans ;
- **L'axe distal 2** (bleu), celui de la **médio-carpienne** est oblique d'arrière en avant et de dedans en dehors.

Ceci explique que les mouvements de flexion-extension soient toujours combinés à d'autres composantes ; par exemple, une composante de rotation longitudinale en pronation ou en supination, des composantes qui s'annulent mutuellement :

- **Dans la flexion** (Fig. 102 : vue perspective antéro-interne), la rangée supérieure tourne en pronation, ce qui produit un mouvement composite de **flexion/abduction/pronation**, alors que l'inférieure tourne en supination, déterminant un mouvement composite de **flexion/adduction/supination**. Les composantes de flexion s'additionnent, tandis que les composantes d'adduction/abduction et de pronation/supination s'annulent ;
- **Dans l'extension** (Fig. 103 : même perspective), la rangée supérieure tourne en supination, ce qui produit un mouvement composite d'**extension/adduction/supination**, alors que l'inférieure tourne en pronation, déterminant un mouvement composite **extension/abduction/pronation**. Là encore, les composantes d'extension s'additionnent, tandis que les composantes d'adduction/abduction et de pronation/supination s'annulent.

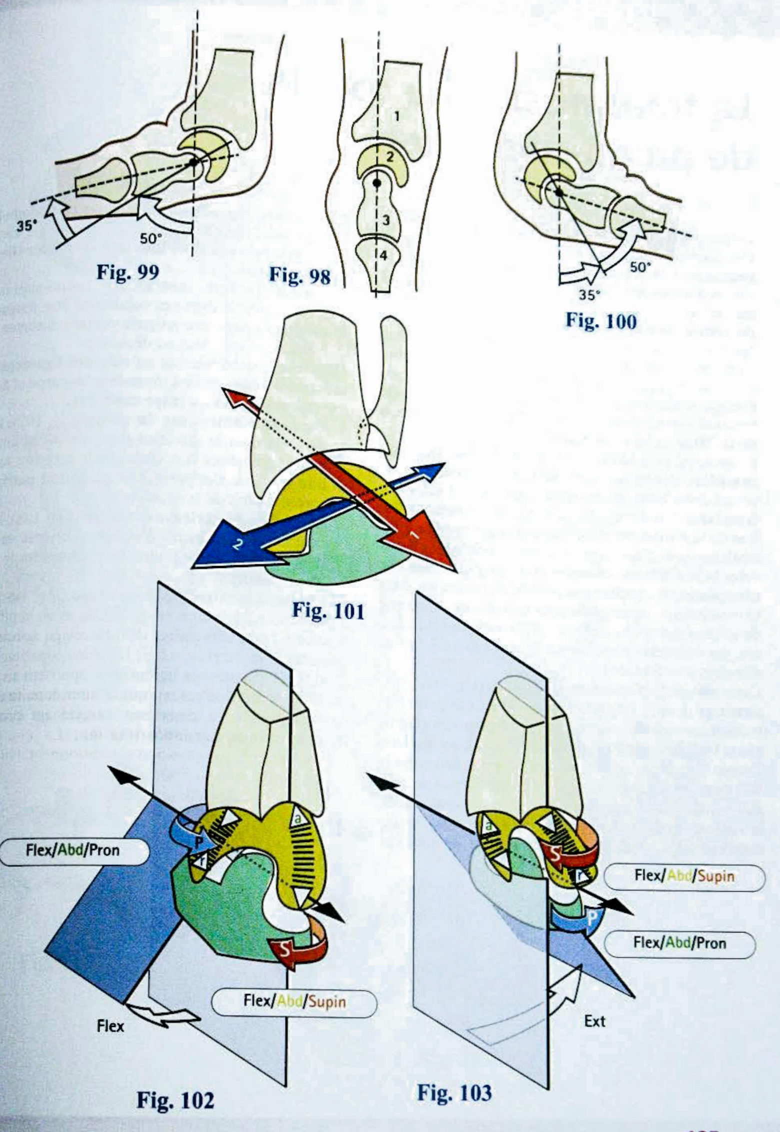


Fig. 99

Fig. 98

Fig. 100

Fig. 101

Fig. 102

Fig. 103

La transmission du couple de prono-supination

Le poignet considéré comme un cardan

Considérer le poignet comme étant une articulation uniquement dédiée aux mouvements de flexion-extension et d'abduction-adduction, est une grave erreur qui méconnaît son rôle dans la **transmission à la main du couple de rotation développé dans l'avant-bras** par les muscles moteurs de la pronation-supination. Cette erreur est couramment commise, car on ne mesure que les amplitudes de flexion-extension et d'abduction-adduction, mais rarement les **amplitudes de pronation-supination** et surtout la **force de rotation de la main, contre résistance**.

Le poignet possédant **deux axes**, il doit donc être **considéré mécaniquement comme un cardan**, (*Universal Joint* pour les auteurs anglophones) En effet, **Gerolamo Cardano** (1501-1576), mathématicien italien de la Renaissance est l'inventeur de ce type d'articulation, qui d'abord servit pour suspendre les boussoles hors d'atteinte du roulis et du tangage, mais elle est maintenant couramment utilisée en particulier dans la construction automobile pour transmettre un couple de rotation entre deux arbres qui ne sont pas co-linéaires, par exemple entre moteur et roues avant à la fois directrices et motrices.

Cette articulation comporte **deux axes** (Fig. 104), matérialisés dans le croisillon (cartouche), qui permet la transmission de la rotation de l'axe primaire (flèche rouge) à l'axe secondaire (flèche bleue) quel que soit l'angle formé par ces deux axes. C'est exactement le rôle du poignet (Fig. 105), qui ne comporte pas de croisillon matérialisé, mais deux articulations successives, la radio-carpienne et la médio-carpienne, qui ne demandent qu'a se disloquer sous l'effort de rotation.

C'est le cas de la radio-carpienne, **très peu emboîtée**, de type condylien (Fig. 106), où le condyle carpien peut facilement échapper sous la glène radiale (flèches bleue et rouge).

Comment l'effort moteur de prono-supination (Fig. 105) peut-il dans ces conditions être transmis à la main qui tourne une poignée contre résistance (flèche bleue) ou qui visse ou dévisse ?

On pense immédiatement au **rôle des ligaments** qui unissent les deux os de l'avant-bras au carpe et à ceux qui unissent les os du carpe entre eux.

- Sur la **face antérieure du carpe** (Fig. 107), les ligaments dont la direction générale est oblique en haut et en dehors vont entraîner le carpe en supination ou vont s'opposer à la pronation passive du carpe, du fait de la résistance ;
- Sur la **face postérieure du carpe** (Fig. 108), la disposition des ligaments d'obliquité inverse va s'opposer à la supination passive et entraîner le carpe en pronation.

Les **ligaments interosseux du carpe** (Fig. 109) s'opposent à la dislocation en pronation et en supination. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne la première rangée (Fig. 110-111 : vues supérieures) où l'on voit comment ces ligaments s'opposent au glissement du scaphoïde par rapport au semi-lunaire et aussi par rapport à la deuxième rangée en pronation (Fig. 110) et en supination (Fig. 111).

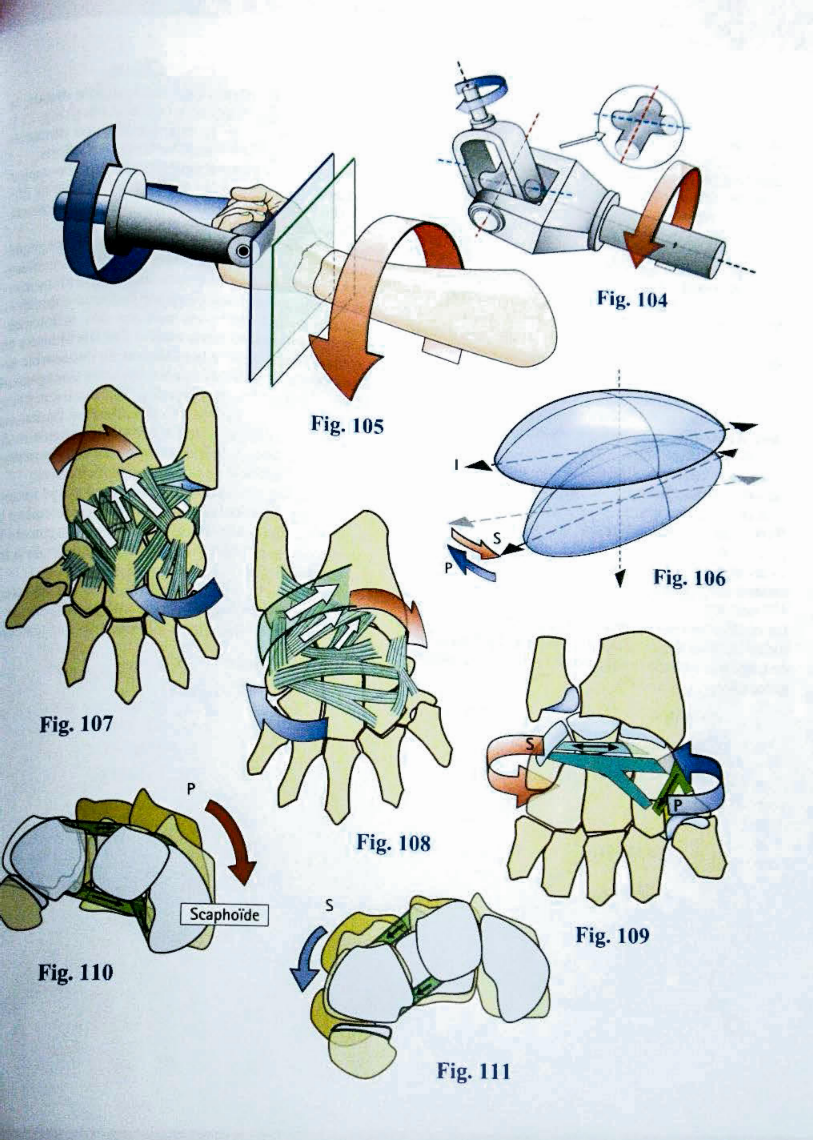


Fig. 104

Fig. 105

Fig. 106

Fig. 107

Fig. 108

Fig. 109

Fig. 110

Fig. 111

Les ligaments ne suffisent pas à assurer la cohésion du massif carpien et la transmission du couple de prono-supination, comme le prouvent les études scannographiques récentes (A. Kapandji) par des coupes fines espacées de 5 mm sur un poignet sous contrainte de prono-supination, sans et avec contraction des muscles fléchisseurs. Les **coupes sériées** passant au niveau de l'extrémité inférieure des deux os de l'avant-bras, de la première et de la deuxième rangée et des métacarpiens permettent d'apprécier les déplacements relatifs des os et leurs changements d'orientation.

Dans une **première série**, tandis que la paume de **la main est fixée passivement**, le sujet effectue des efforts de pronation-supination : au niveau anté-brachial (Fig. 112), la « **dérive rotatoire** » est de 47°30, tandis qu'au niveau métacarpien (Fig. 113), elle est de 4°30. En l'absence de contraction des fléchisseurs, la **dérive rotatoire** entre avant-bras et main est donc de 47°30 – 4°30 soit **43°.**

Dans une **deuxième série**, tandis que **la main se contracte puissamment sur un barreau fixe**, par action des fléchisseurs, le sujet effectue les mêmes efforts de pronation-supination : au niveau anté-brachial (Fig. 114), la dérive est de 25°, tandis qu'au niveau métacarpien (Fig. 115) elle est de 17°. La **dérive rotatoire** entre avant-bras et main n'est plus que 25° - 17° soit **8°**.

La contraction sur résistance des fléchisseurs a donc réduit de 43 à 8°, c'est-à-dire **à moins du cinquième** de celle qui existait uniquement du fait de l'action ligamentaire.

Au niveau de **l'articulation radio-ulnaire distale**, la tendance luxante en prono-supination libre (Fig. 116) est augmentée lors de la prono-supination contrariée (Fig. 117), du fait de l'augmentation des efforts.

Au niveau de **la rangée supérieure**, la prono-supination contrariée (Fig. 118) entraîne une dérive de 30°. Elle modifie aussi (Fig. 119) de 7° la concavité antérieure de la rangée supérieure.

Avec le perfectionnement des moyens scannographiques, des études plus poussées permettront certainement d'analyser plus finement les modifications internes du poignet sous la contrainte de prono-supination. Cependant, une chose est certaine dès maintenant : **c'est la contraction musculaire, des fléchisseurs en particulier, qui assure la cohésion de l'ensemble articulaire du poignet**. Grâce au véritable **encagement du poignet par les tendons** (Fig. 120 : vue antérieure et Fig. 121 : vue postérieure), les muscles produisent un **effet d'embrayage** sur le complexe articulaire du poignet, sans lequel la transmission du couple moteur de prono-supination ne pourrait pas s'effectuer.

La contraction simultanée de l'*extensor carpi ulnaris* (Fig. 122) joue aussi un rôle favorable en retendant la sangle des ligaments annulaires, ce qui augmente la cohésion de la première rangée, et aussi celle de la radio-ulnaire distale.

Une autre conclusion intéressante, c'est que **ce mécanisme ne peut être étudié que sur le vivant**, car la contraction musculaire est indispensable à la cohésion du poignet.

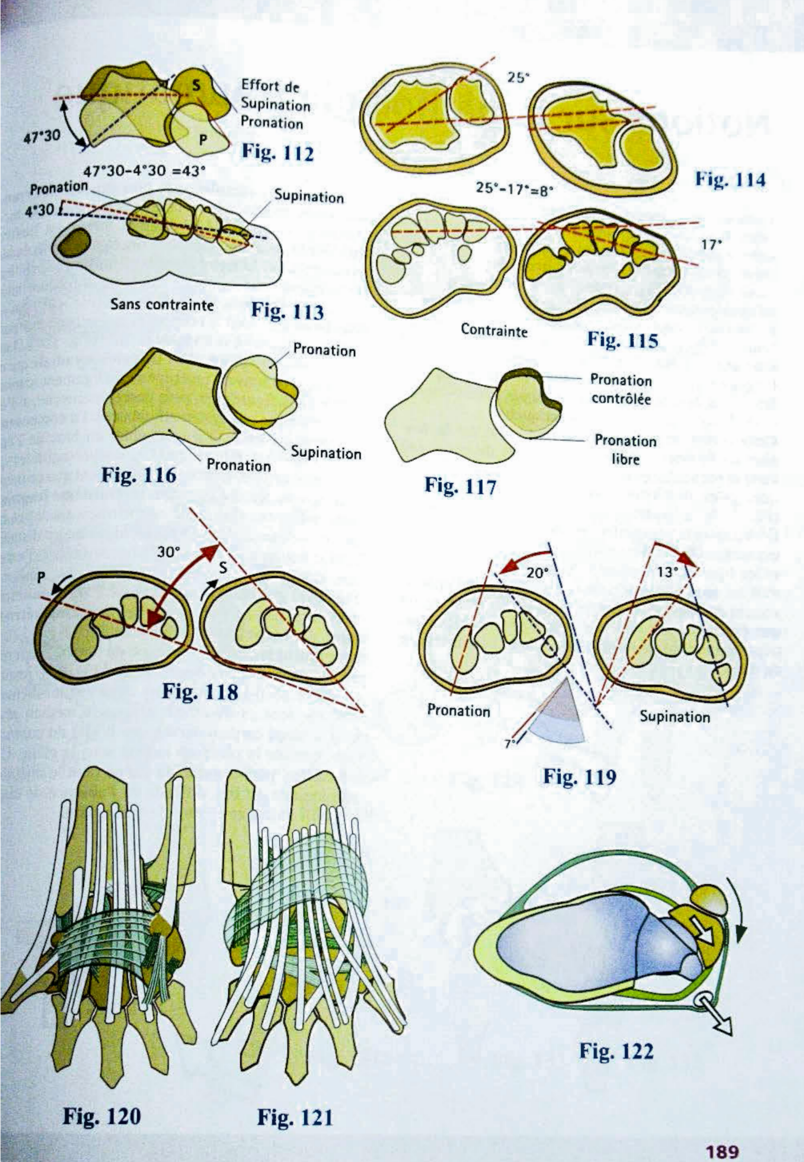


Fig. 112

Fig. 113

Fig. 114

Fig. 115

Fig. 116

Fig. 117

Fig. 118

Fig. 119

Fig. 120

Fig. 121

Fig. 122

Notions sur la pathologie traumatique

Cette coupe scanographique (Fig. 123) passée au niveau de la tête du *capitatum* (grand os), flanquée en dehors par le scaphoïde, en dedans par le prolongement proximal de l'*hamatum* (os crochu), sur lequel vient s'appuyer le *triquetrum* (pyramidal), avec le pisiforme montre que la concavité de la gouttière carpienne varie selon que le poignet se trouve en pronation ou en supination. Elle est plus marquée en supination qu'en pronation par rapprochement des berges de 3 mm (de 47 elle passe à 44 mm) et par bâillement en arrière de 2° de l'interligne scapho-capital et de 7° de l'interligne hamato-triquetral.

Cette concavité est maintenue (Fig. 124) par **la tension du ligament annulaire antérieur du carpe** (en vert) et par les ligaments interosseux antérieurs. Lorsque, pour traiter un syndrome du canal carpien (Fig. 125), ce ligament, qui constitue pour les tendons fléchisseurs **la plus puissante poulie de l'organisme**, est sectionné, les berges vont s'écarter de 3 à 5 mm, et les ligaments interosseux antérieurs (Fig. 126) seront les seuls (flèches noires) à s'opposer à l'aplatissement de la concavité carpienne. Il faut donc, plutôt que des sections simples, s'attacher à faire des plasties d'agrandissement du ligament annulaire antérieur du carpe.

Le poignet est l'articulation **la plus exposée aux traumatismes**, en général une chute sur la main en abduction et en extension. **L'abduction forcée** est limitée par deux facteurs : la résistance des ligaments fixés sur le pyramidal et la styloïde radiale. Suivant la position du scaphoïde par rapport à la glène, la fracture intéresse soit l'**épiphyse radiale distale** (Fig. 127) qui se détache en bloc, soit le **scaphoïde** qui se brise à sa partie moyenne contre la styloïde radiale (Fig. 128). Dans d'autres circonstances, c'est la **styloïde radiale** qui se fracture, avec souvent une rupture du ligament scapholunaire (non figuré), qui peut passer inaperçue, si l'on ne la recherche pas systématiquement. La composante d'extension contribue à la fracture en bloc de l'épiphyse radiale distale (Fig. 129 : coupe sagittale) qui bascule en arrière. Il arrive fréquemment que ce même traumatisme détache du radius un **troisième fragment postéro-interne** (Fig. 130 : coupe transversale) ce qui compromet aussi l'articulation radio-ulnaire distale.

Dans d'autres circonstances, le mouvement d'extension rompt les attaches antérieures du *capitatum* (Fig. 131) qui va se luxer en arrière du semi-lunaire resté en place, ce qui réalise une **luxation rétro-lunaire du carpe**. Mais cette luxation (Fig. 132), en comprimant la corne postérieure du lunaire, peut rompre ses attaches postérieures (Fig. 133), et le luxer en avant. Le semi-lunaire tourne alors sur lui-même de 180° et vient en avant comprimer le médian retenu dans le canal carpien, tandis que la tête du *capitatum* vient prendre la place du lunaire sous la glène. C'est la **luxation péri-lunaire du carpe** dont le diagnostic radiologique est très difficile en l'absence de clichés de profil stricts et surtout de trois quarts.

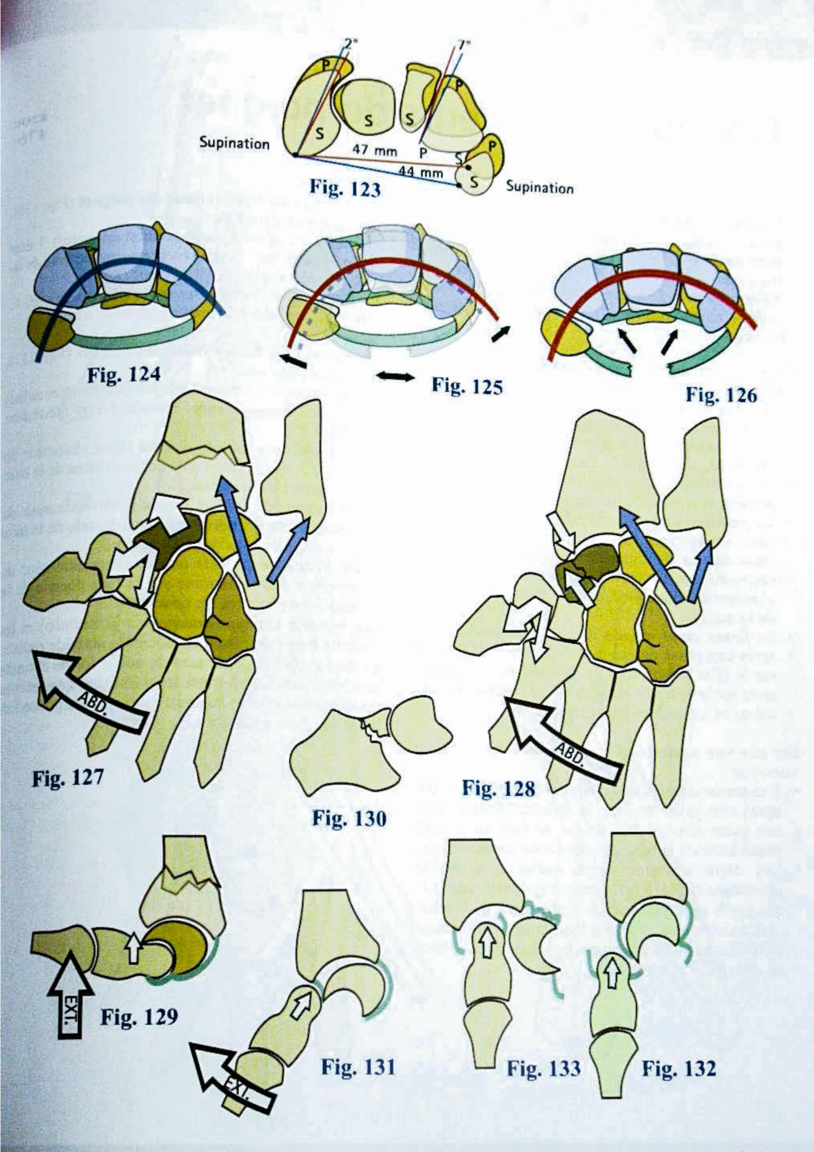


Fig. 123

Fig. 124

Fig. 125

Fig. 126

Fig. 127

Fig. 128

Fig. 130

Fig. 129

Fig. 131

Fig. 133

Fig. 132

Les muscles moteurs du poignet

Les tendons des muscles moteurs du poignet constituent, comme nous l'avons vu, un véritable encagement du poignet : ce sont les muscles moteurs extrinsèques des doigts et les moteurs du poignet, dont seul le *flexor carpi ulnaris* (cubital antérieur) se fixe sur un os de la rangée proximale du carpe, à savoir le pisiforme.

Sur une **vue antérieure du poignet** (Fig. 134), on voit :

- Le ***flexor carpi radialis*** (grand palmaire) **1** qui, après avoir parcouru un canal spécial et séparé du canal carpien, sous le ligament annulaire antérieur du carpe, se fixe sur la face antérieure de la base du deuxième métacarpien, et accessoirement sur le trapèze et la base du troisième métacarpien ;
- Le ***palmaris longus*** (petit palmaire) **2**, moins puissant, qui tisse ses fibres verticales avec les fibres transversales du ligament annulaire antérieur du carpe et envoie quatre bandelettes prétendineuses s'insérer à la face profonde du derme de la paume de la main ;
- Le ***flexor carpi ulnaris*** (cubital antérieur) **3**, qui, après être passé devant la styloïde ulnaire, s'insère sur le pôle supérieur du pisiforme, et accessoirement sur le ligament annulaire, l'os crochu, les quatrième et cinquième métacarpiens.

Sur une **vue postérieure du poignet** (Fig. 135), on distingue :

- ***L'extensor carpi ulnaris*** (cubital postérieur) **4**, qui, après être passé derrière la styloïde ulnaire, dans une gaine fibreuse très solide, se fixe sur la face postérieure de la base du cinquième métacarpien ;
- Les deux ***extensor carpi radialis*****, le *brevis*** (deuxième radial) **5**, et le ***longus*** (premier radial) **6**, qui, après avoir parcouru la partie haute de la tabatière anatomique, se fixent le premier **6** sur la base du troisième métacarpien, le deuxième **5** sur la base du deuxième métacarpien.

Sur une **vue du bord interne du poignet** (Fig. 136), on retrouve les tendons :

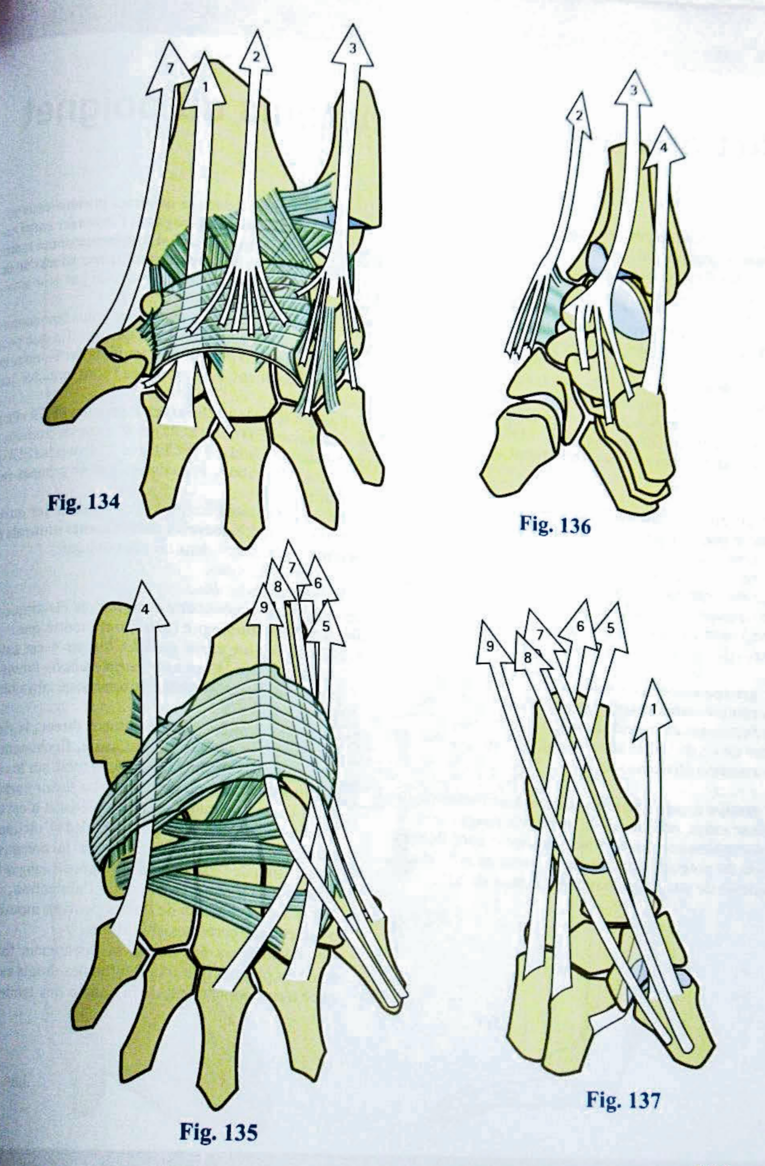
- Du ***flexor carpi ulnaris*** (cubital antérieur) **3** dont l'efficacité sur le carpe est accrue par le bras de levier que constitue le pisiforme ;
- De ***l'extensor carpi ulnaris*** (cubital postérieur) **4**.

Ces deux tendons encadrent la styloïde ulnaire.

Sur une **vue du bord externe du poignet** (Fig. 137), on retrouve les tendons :

- De ***l'extensor carpi radialis longus*** (premier radial) **6** et de ***l'extensor carpi radialis brevis*** (deuxième radial) **5** ;
- De ***l'abductor pollicis longus*** (long abducteur du pouce) **7**, qui se fixe sur la partie externe de la base du premier métacarpien ;
- De ***l'extensor pollicis brevis*** (court extenseur du pouce) **8**, qui s'insère sur la face dorsale de la base de la première phalange du pouce ;
- De ***l'extensor pollicis longus*** (long extenseur du pouce) **9**, qui se termine sur la face dorsale de la deuxième phalange du pouce.

Les muscles radiaux (*extensor carpi radialis*) et les muscles longs du pouce encadrent la styloïde radiale. Le tendon du long extenseur du pouce forme la limite postérieure de la **tabatière anatomique**. Les tendons du long abducteur et du court extenseur du pouce forment sa limite antérieure.


7
1
2
3
Fig. 134
2
3
4
Fig. 136
4
7
8
6
9
5
Fig. 135
9
7
6
5
8
1
Fig. 137

Actions des muscles moteurs du poignet

Les muscles moteurs du poignet se répartissent en **quatre groupes**, définis fonctionnellement, par rapport aux deux axes du poignet (Fig. 138 : coupe transversale) :

- Axe **AA'** de **flexion-extension** (flèches rouges) ;
- Axe **BB'** d'**adduction-abduction** (flèches bleues).

Ce schéma représente la partie inférieure de la coupe du poignet droit, donc **B** est en avant, **B'** en arrière, **A'** en dehors, **A** en dedans. Les tendons représentent les moteurs du poignet et les moteurs des doigts. Les légendes se retrouvent identiques sur le schéma d'une vue postérieure du poignet (Fig. 139). Les légendes des muscles moteurs des doigts sont détaillées plus loin.

1er groupe contenu dans le quadrant antéro-interne : le ***flexor carpi ulnaris*** (cubital antérieur) **1** est simultanément fléchisseur du poignet, étant situé en avant de l'axe **AA'**, fléchisseur du cinquième méta sur le carpe, par ses expansions et adducteur de la main, en raison de sa situation en dedans de l'axe **BB'**. La main gauche jouant du violon est un exemple de flexion-adduction.

2e groupe contenu dans le quadrant postéro-interne : l'***extensor carpi ulnaris*** (cubital postérieur) **6** est simultanément extenseur du poignet, étant situé en arrière de l'axe **AA'** et adducteur de la main, du fait de sa situation en dedans de **BB'**.

3e groupe contenu dans le quadrant antéro-externe : le ***flexor carpi radialis*** et le ***palmaris longus*** soit le grand palmaire **2** et le petit palmaire **3** sont fléchisseurs du poignet, étant situés en avant de **AA'** et abducteurs de par leur situation en dehors de **BB'**.

4e groupe contenu dans le quadrant postéro-externe : l'***extensor carpi radialis longus*** et l'***extensor carpi radialis brevis***, le premier radial **4** et le deuxième radial **5** sont extenseurs du poignet étant situés en arrière de l'axe **AA'** et abducteurs de la main, de par leur situation en dehors de l'axe **BB'**.

En suivant cette théorie, aucun des muscles moteurs du poignet n'a d'action pure, ce qui signifie que pour obtenir une action pure, il faut toujours faire entrer en jeu simultanément deux groupes, pour annuler une composante :

- Flexion (Flex) : 1er (FCU) et 3e groupes (FCR+PL) ;
- Extension (Ext) : 2e (ECU) et 4e groupes (*radialis*) ;
- Adduction (Add) : 1er (CFU) et 2e groupes (ECU) ;
- Abduction (Abd) : 3e (*palmaris*) et 4e groupes (*radialis*).

Ainsi se définissent les mouvements dans les quatre plans de référence, mais les **mouvements naturels du poignet** s'effectuent dans un plan oblique :

- Flexion-adduction ;
- Extension-abduction.

En outre, les expériences d'excitation électrique de **Duchenne de Boulogne** (1867) ont montré que :

- Seul l'*extensor carpi radialis longus* **4** est extenseur-abducteur ; l'*extensor carpi radialis brevis* est extenseur direct, d'où son importance physiologique ;
- Le *palmaris longus* est fléchisseur direct ; le *flexor carpi radialis longus* est, lui aussi, fléchisseur direct ; de plus il fléchit le deuxième méta sur le carpe entraînant la main en pronation. Le *flexor carpi radialis* (grand palmaire) excité isolément n'est donc pas abducteur, et s'il se contracte dans l'inclinaison radiale, c'est pour contrebalancer la composante d'extension de l'*extensor carpi radialis longus* (premier radial) moteur essentiel de l'abduction ;
- Les muscles moteurs de doigts peuvent mouvoir le poignet dans certaines conditions ;
- Les fléchisseurs des doigts ne deviennent fléchisseurs du poignet que si la flexion des doigts est bloquée avant épuisement de la course des tendons.

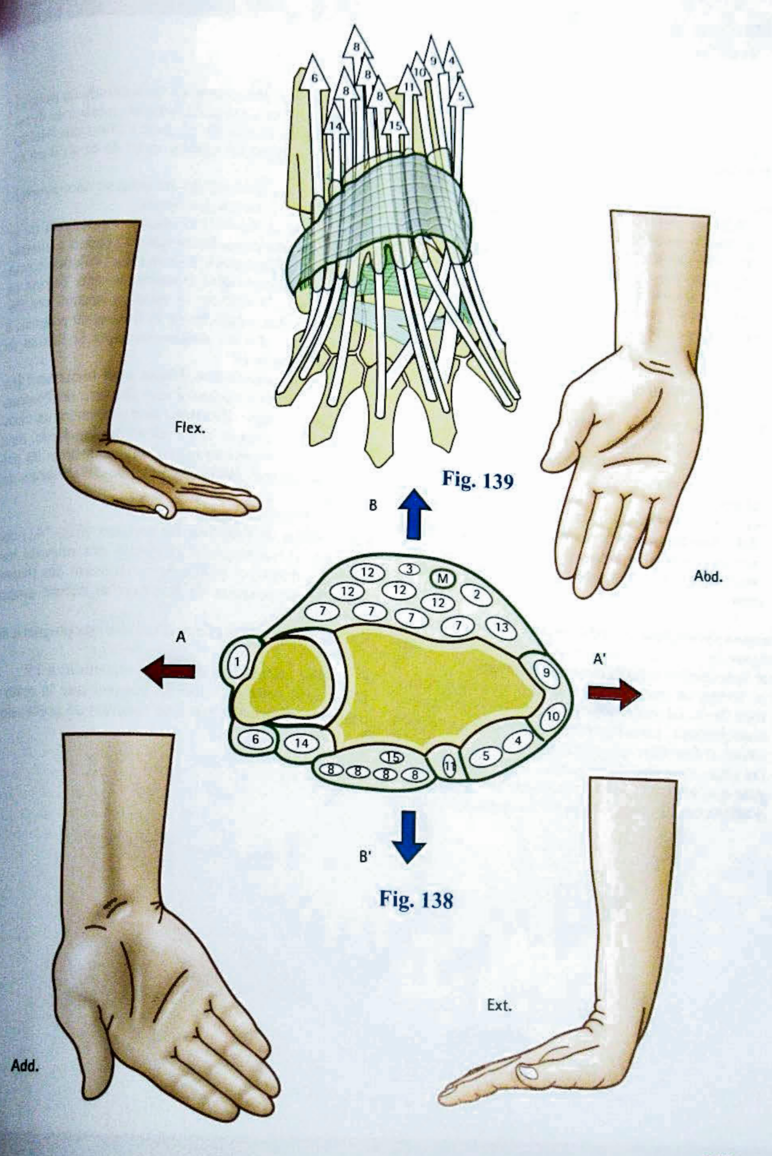


Fig. 139

Fig. 138

Si la main tient un objet volumineux, par exemple une bouteille, la flexion du poignet peut être aidée par les fléchisseurs des doigts.

De même, les extenseurs des doigts **8** participent à l'extension du poignet si le poing est fermé ;

- L'***abductor pollicis longus*** (long abducteur) **9** et l'***extensor pollicis brevis*** (court extenseur du pouce) 10 deviennent abducteurs du poignet si leur action n'est pas contrebalancée par celle de l'*extensor carpi ulnaris*. L'abduction isolée du pouce ne se produit sous l'action du long abducteur que si l'*extensor carpi ulnaris* se contracte simultanément. L'action synergique de l'*extensor carpi ulnaris* est donc indispensable à l'abduction du pouce. En ce sens, on peut dire que ce muscle est un stabilisateur du poignet ;
- L'***extensor pollicis longus*** (long extenseur du pouce) **11**, qui produit une extension et une rétropulsion du pouce, peut entraîner une abduction et une extension du poignet si le cubital antérieur est relâché ;
- Autre stabilisateur du poignet, l'***extensor carpi radialis longus*** (premier radial) **4** est indispensable pour maintenir une bonne position de la main : sa paralysie entraîne une inclinaison cubitale permanente.

L'action synergique et stabilisatrice des muscles du poignet (Fig. 140) : les muscles extenseurs du poignet sont synergiques des fléchisseurs des doigts.

- **a** : lorsqu'on étend le poignet (improprement nommée flexion dorsale) les doigts se fléchissent automatiquement ; pour étendre les doigts dans cette position, il faut faire un effort volontaire ;
- De plus, c'est dans la position d'extension du poignet que les fléchisseurs possèdent leur maximum d'efficacité, car les tendons fléchisseurs sont alors relativement plus courts qu'en rectitude du poignet et a fortiori en flexion du poignet : mesuré au dynamomètre en flexion du poignet, l'effort des fléchisseurs des doigts est égal au quart de ce qu'il est en extension ;
- Les muscles fléchisseurs du poignet sont synergiques des extenseurs des doigts ;
- **b** : lorsqu'on fléchit le poignet, l'extension de la première phalange des doigts se produit automatiquement ; il faut alors faire un effort volontaire pour fléchir les doigts dans la paume et cette flexion est sans force. D'ailleurs, la mise en tension des fléchisseurs des doigts limite la flexion du poignet ; il suffit d'étendre les doigts pour que la flexion du poignet gagne 10°.

Cet équilibre musculaire délicat peut facilement être perturbé : la déformation d'une fracture de Pouteau-Colles non réduite détermine non seulement un changement d'orientation de la glène antibrachiale, mais encore un allongement relatif des extenseurs du poignet, retentissant sur l'efficacité des fléchisseurs des doigts.

La position de fonction du poignet (Fig. 141) correspond au maximum d'efficacité des muscles moteurs des doigts, et plus particulièrement des fléchisseurs. Cette position de fonction se définit comme suit :

- Légère extension (flexion dorsale) du poignet à 40-45° ;
- Légère inclinaison cubitale (adduction) à 15°.

C'est dans cette position du poignet que la main se trouve le mieux adaptée à sa fonction de préhension.

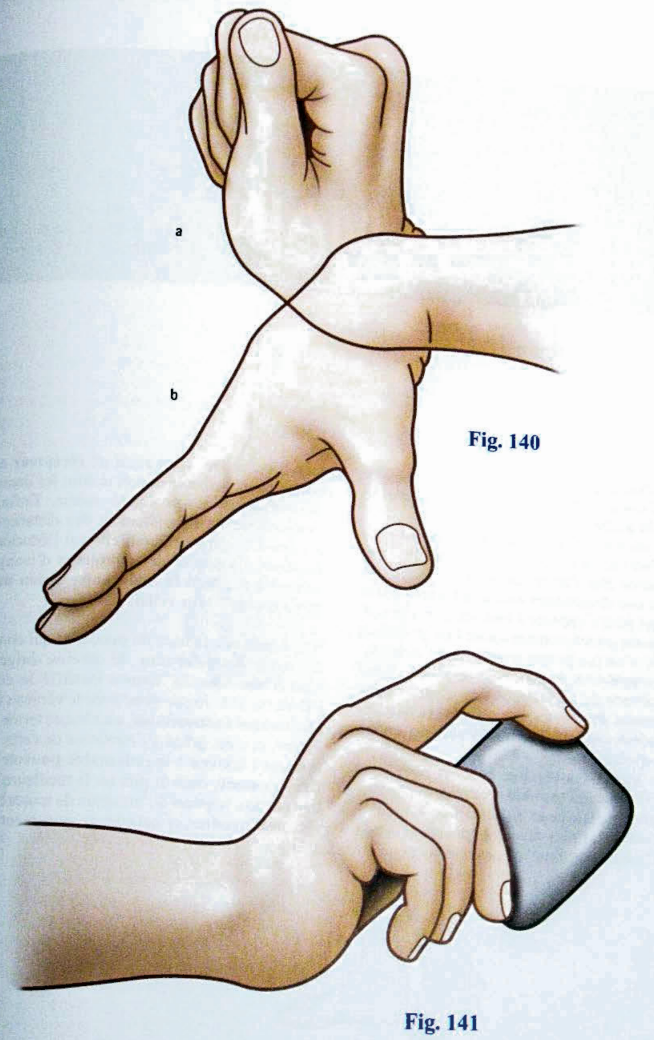


Fig. 140

Fig. 141

Chapitre 5

LA MAIN

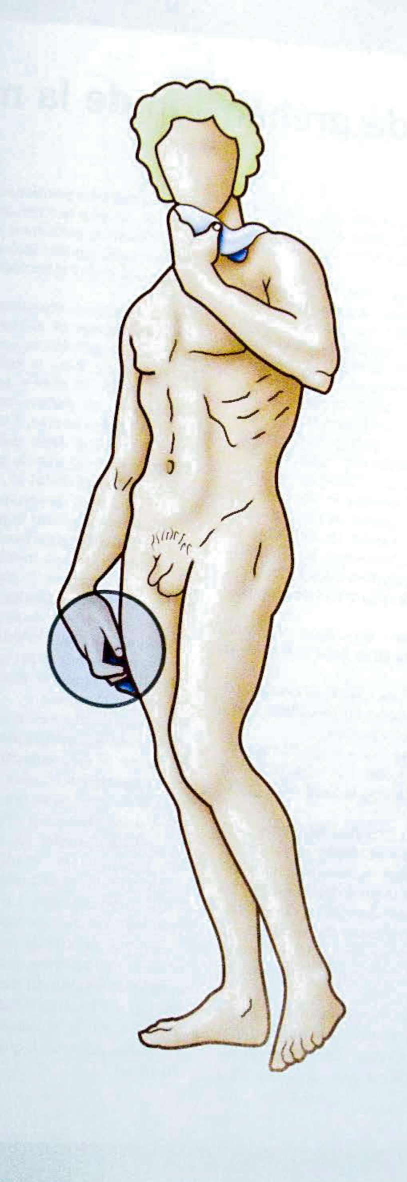
La main de l'homme est un merveilleux outil, capable d'exécuter d'innombrables actions grâce à sa fonction essentielle : **la préhension.**

De la pince du homard à la main du singe, cette faculté de préhension se retrouve, mais chez aucun autre que l'homme elle n'atteint ce degré de perfection. Elle le doit à une **disposition tout à fait particulière du pouce**, qui peut s'opposer à tous les autres doigts. L'**opposition du pouce**, contrairement à ce qu'on voit souvent écrit, n'est pas propre seulement à l'Homme : chez le singe supérieur, le pouce est opposable, mais jamais l'amplitude de cette opposition n'atteint celle du pouce humain. Par contre, certains singes quadrumanes possèdent, comme leur nom l'indique, quatre mains, donc quatre pouces.

Du point de vue physiologique, la main représente l'extrémité effectrice du membre supérieur qui constitue son **support logistique** et lui permet de se présenter dans la position la plus favorable pour une action donnée. Cependant, la main n'est pas seulement un organe d'exécution, c'est aussi un **récepteur sensoriel** extrêmement sensible et précis dont les données sont indispensables à son action même. Enfin, par la connaissance de l'épaisseur et des distances qu'elle procure au cortex cérébral, elle est l'éducateur de la vue dont elle permet de contrôler et d'interpréter les informations : **sans la main notre vision du monde serait plate et sans relief**.

Plus que l'opposabilité du pouce, ce qui compte c'est le **couple main-cerveau** : le cerveau dirige la main, mais à son tour, la main a modifié le cerveau de l'Homme. Elle forme donc avec le cerveau un **couple fonctionnel indissociable**, où chaque terme réagit sur l'autre, et c'est grâce à l'étroitesse de cette inter-relation que l'homme a **le redoutable pouvoir de modifier la nature**, dans la pire ou la meilleure des intentions et de s'imposer à l'encontre de toutes les espèces vivantes terrestres, ce qui engage gravement sa responsabilité.

N.B. La compréhension de ce chapitre peut être grandement facilitée par la construction du modèle mécanique de main (voir en fin de volume).



La faculté de préhension de la main

Cette faculté de **préhension,** la main de l'homme la doit à son architecture lui permettant d'être soit largement étalée, soit refermée sur elle-même ou autour d'un objet.

Lorsqu'elle est largement étalée (Fig. 1), la main, vue par sa face antérieure, présente sa **paume** 1, faisant suite au poignet 9 et articulée avec les cinq doigts; cette face antérieure est aussi appelée **face palmaire**. La paume est creuse dans son centre, ce qui lui permet de loger des objets plus ou moins volumineux. Le creux de la main est bordé latéralement par **deux éminences ou saillies convexes**: en dehors, la plus volumineuse, **l'éminence thénar** 4, qui représente la **base du pouce**, et, en dedans, **l'éminence hypo-thénar** 7, moins saillante – comme son nom l'indique – et à l'extrémité distale de laquelle s'implante le plus petit des cinq doigts, l'**auriculaire**. La paume est parcourue par les plis palmaires, variables suivant les individus, ce qui est à la base d'une pseudo-science, la chiromancie – étymologiquement, divination dans la main. À titre anecdotique, les noms des plis seront donnés dans les deux notations:

- Le **pli palmaire inférieur** 2 ou « ligne de tête », est le plus distal, commençant au bord interne de la paume;
- **Le pli palmaire moyen** 3 ou « ligne de cœur », situé proximalement par rapport au précédent, commence au bord externe de la paume;
- Le **pli palmaire supérieur** 5 ou « ligne de vie », le plus proximal, borde en dedans l'éminence thénar. Son obliquité diagonale dessine **le fond de la gouttière palmaire**;
- Il existe aussi un petit pli longitudinal moins marqué, qui borde en dedans l'éminence hypo-thénar, et qu'on peut faire apparaître en resserrant transversalement la paume; c'est le **pli hypothénarien** ou ligne de « chance », le plus inconstant des quatre. Au bord interne de l'éminence hypo-thénar, la contraction d'un petit muscle « peaucier », le *palmaris brevis*, ou palmaire cutané, fait apparaître une fossette **8**.

La description de ces plis n'est pas gratuite: il s'agit de repères importants de la paume, qui sont maintenus en dépression par des tractus fibreux les reliant aux structures profondes, grâce à quoi, la paume reste concave en toutes positions de la main. Sur le plan chirurgical, ces plis servent de repères pour les structures profondes et ne doivent jamais être coupés perpendiculairement par des incisions, sous peine de voir se former des brides rétractiles limitant la fonction de la main.

Les cinq doigts se répartissent en deux groupes: **quatre doigts longs et un court**, le pouce. Les quatre doigts longs sont de longueur inégale: le plus long occupe le centre, c'est le ***médius*** ou le majeur; ensuite vient l'**index**, le plus externe de doigts longs, puis l'**annulaire**, en dedans du médius, et enfin le plus court et le plus interne, l'**auriculaire**. Tous les doigts longs présentent **trois plis palmaires**, traduisant la présence sous-jacente de trois phalanges:

- Le **pli digital distal** 17, en général unique, situé un peu au-dessus de son interligne articulaire, et limitant proximalement la **pulpe** 18;
- Le **pli digital proximal** 14, toujours double, situé au niveau de son interligne articulaire, et limitant proximalement la 2[e] phalange;
- Le **pli digito-palmaire** 12, unique ou dédoublé, situé à la jonction du doigt avec la paume, situé au-dessous de son interligne articulaire et limitant proximalement la première phalange.

Ces plis ont la même fonction d'amarrage cutané que les plis de la paume.

Le **pouce**, doigt court, unique et **proximal** est implanté à la **partie supérieure du bord radial** (ou externe) de la paume. Il ne comporte que **deux phalanges**, mais **un métacarpien** 32 plus mobile que les autres, le premier métacarpien, ce qui en fait l'équivalent fonctionnel d'une phalange. Il présente deux plis palmaires: le **pli palmaire distal** 23, unique, un peu au-dessus de son interligne et le **pli de la métacarpo-phalangienne**, toujours dédoublé 20 et 21, proximal par rapport à son interligne. Le **talon de l'éminence thénar** 6 correspond au tubercule du scaphoïde.

À la partie proximale de la paume, la jonction avec le poignet est marquée par plusieurs plis transversaux, les **plis de flexion du poignet** 9, situés distalement par rapport à l'interligne radio-carpienne. Sur le poignet, on remarque la saillie du tendon du ***palmaris longus*** **10** (grand palmaire), qui limite en dedans la **gouttière du pouls** 11.

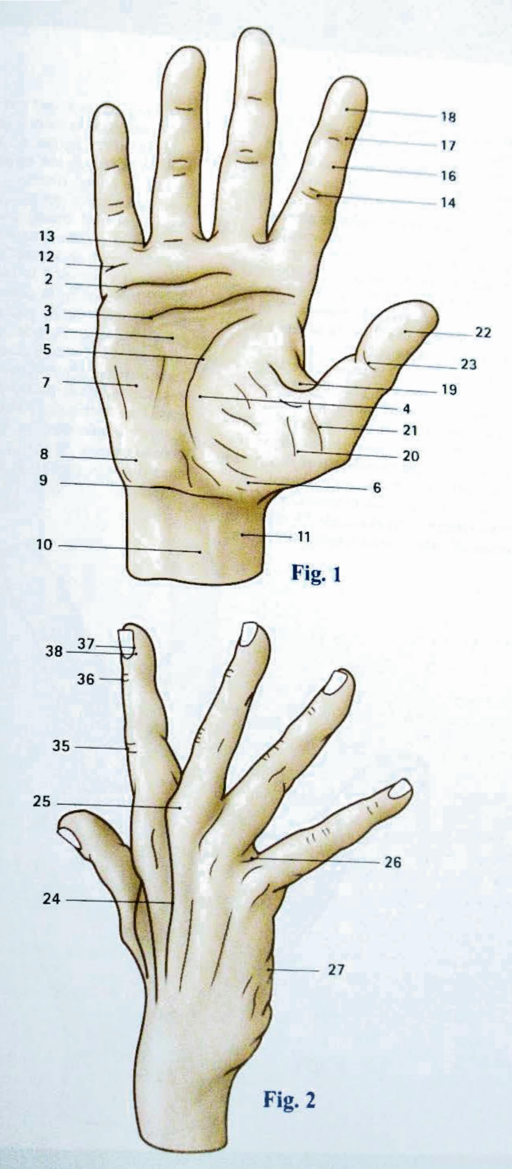

18
17
16
14
13
12
2
3
1
5
7
22
23
19
4
21
20
8
9
6
10
11
37
38
36
35
25
26
24
27

Fig. 1

Fig. 2

Lorsque la main s'apprête à saisir un objet (Fig. 3 : vue latérale externe), les doigts longs s'allongent sous l'action des extenseurs. L'extension des doigts diminue de l'index à l'auriculaire tandis que le pouce s'étend et s'écarte en abduction, grâce à la profondeur de sa **commissure 19**. La **métacarpo-phalangienne 33** est légèrement saillante, ce que n'est pas normalement la **trapézo-métacarpienne 31**. Au-dessus se situe le creux de la **tabatière anatomique 28**, bordée par le tendon de l'***extensor pollicis longus* 30**. Au bord externe du poignet se situe la **styloïde radiale 29**, et, dorsalement, du côté interne, la **saillie de la tête ulnaire** 34, qui disparaît en supination.

Vue du **côté interne** (Fig. 2) la main qui s'apprête à saisir présente une torsion, un gauchissement de la paume, dû à l'avancée des métacarpiens d'autant plus marquée qu'elle concerne un métacarpien interne. Ceci est particulièrement net pour le cinquième. Entre la base des doigts, le **pli commissural 26** est saillant du côté palmaire. Les **têtes métacarpiennes 25** sont saillantes de même que les **extenseurs 24**. Les plis de l'**inter-phalangienne proximale 35**, et de l'**inter-phalangienne distale 36** sont toujours marqués.

Les cinq doigts n'ont pas la même importance dans l'utilisation de la main (fig. 4) qui comporte trois parties : le **pouce I** joue, à l'évidence le rôle prépondérant en raison de son **opposabilité** aux autres doigts : perdre le pouce réduit la main à presque rien, c'est pourquoi tout ce qui peut entraîner un risque pour ce doigt doit être banni, comme porter une bague au pouce, qui expose à un « dégantage » catastrophique si l'anneau est accidentellement accroché. La **zone des pinces** II comprend le **médius** et surtout l'**index** indispensables pour la constitution de la **pince bi-digitale** (pouce/index) – pince de précision – ou la **pince tri-digitale** (pouce/index/médius) – pince de saisie des aliments pour encore plus de la moitié de l'humanité. La moitié radiale de la main est donc la main des pinces. La **zone des prises III**, bord cubital de la main, avec l'**annulaire** et l'**auriculaire** indispensable pour assurer la fermeté de la **prise à pleine paume** ou encore **la poigne** : mode de prise pour la saisie des manches d'outils, **prises de force**, dont il est difficile de se passer.

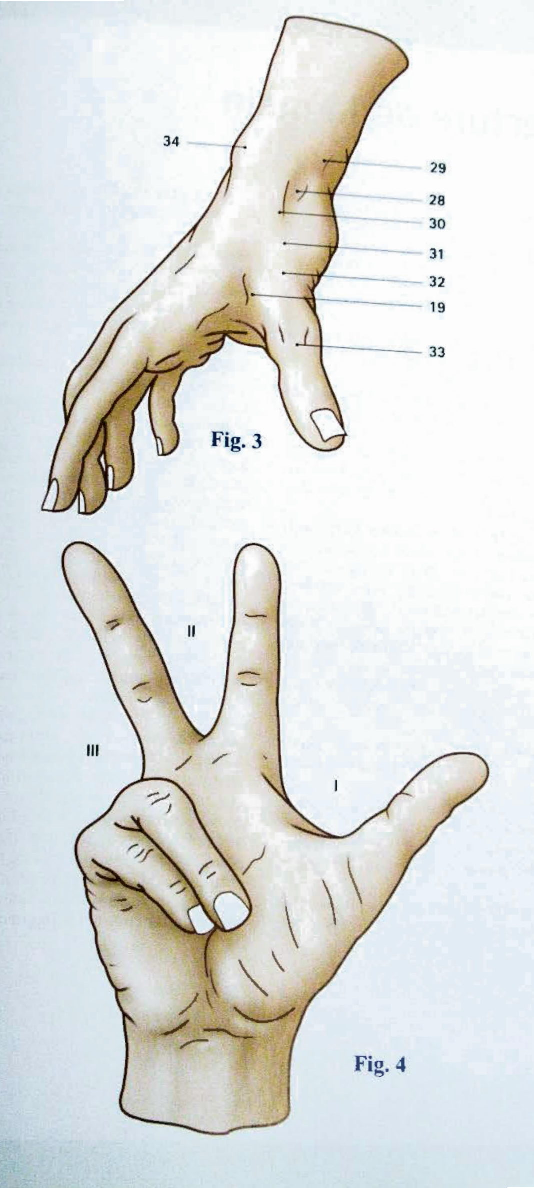


Fig. 3

Fig. 4

Architecture de la main

La main peut adapter sa forme pour saisir les objets. Sur une **surface plane**, une vitre par exemple (Fig. 5), **la main s'étale et s'aplatit**, prenant contact (Fig. 6) par l'éminence thénar **1**, l'éminence hypothénar **2**, la tête des métacarpiens **3** et la face palmaire des phalanges **4**. Seule la partie inféro-externe de la paume reste à distance.

Lorsqu'il faut saisir un objet volumineux, **la main se creuse** et l'on voit se constituer des arches suivant **trois directions**:

1) **Dans le sens transversal** (Fig. 7): l'**arche carpienne** XOY qui correspond à la concavité du massif carpien, se prolonge distalement par l'**arche métacarpienne** sur laquelle s'alignent les têtes des métacarpiens. L'axe longitudinal de la gouttière carpienne passe par le semi-lunaire, le grand os et le troisième métacarpien;
2) **Dans le sens longitudinal**, les **arches carpo-métacarpo-phalangiennes** qui affectent une disposition rayonnante à partir du massif carpien, et sont constituées, pour chaque doigt, par le métacarpien et les phalanges correspondantes. La concavité de ces arches s'oriente en avant de la paume et la **clé de voûte** se situe au niveau de l'**articulation métacarpo-phalangienne**: un déséquilibre musculaire en ce point entraîne une rupture de la courbure. Les deux plus importantes arches longitudinales sont:
   - **L'arche du médius** OD3, (Fig. 7), arche axiale car elle prolonge l'axe de la gouttière carpienne, et surtout;
   - **L'arche de l'index** OD2, (Fig. 8), qui s'oppose le plus souvent à celle du pouce.
3) **Dans le sens oblique** (Fig. 7, 8 et 9), les **arches d'opposition du pouce** avec les quatre autres doigts:
   - **La plus importante** de ces arches obliques réunit et oppose le pouce et l'index: **DI - D2** (Fig. 8);
   - **La plus extrême** des arches d'opposition passe par le pouce et l'auriculaire: **DI D5**, (Fig. 7, 8 et 9).

Dans son ensemble, lorsque la main se creuse (Fig. 8), elle forme une gouttière à concavité antérieure dont les berges sont bornées par trois points:

1) Le pouce **DI**, qui forme à lui seul la berge externe;
2) L'index D2 et l'aurieulaire D5, qui limitent la berge interne;
3) Entre ces deux berges se déploient les **quatre arches d'opposition**.

La direction générale de cette **gouttière palmaire est oblique** - figurée par la grosse flèche bleue contenue dans la main (Fig. 8 et 9) - est croisée par rapport aux arches d'opposition: elle est donnée par une ligne tendue du talon de l'éminence hypothénar X (Fig. 7) - où la palpation perçoit le pisiforme - à la tête du deuxième métacarpien Z (Fig. 7). Cette direction est tracée dans la paume par la partie moyenne du pli d'opposition du pouce (« ligne de vie »). C'est aussi la direction que prend un objet cylindrique saisi à pleine main, le manche d'un outil, par exemple.

Inversement, lorsque les doigts s'écartent au maximum (Fig. 10), la main s'aplatit et la distance maximum entre la pulpe du pouce et celle de l'auriculaire se nomme l'**empan**, qui pour un pianiste doit atteindre au moins l'octave.

Enfin, il est impossible de ne pas remarquer que dans toutes ces positions une **main normale et saine** présente une **architecture harmonieuse** (Fig. 11) dont on peut suivre les lignes de construction – ici les spirales qui unissent les articulations homologues et qui convergent en un point focal (étoile) - tellement utiles aux peintres et aux dessinateurs, mais qui sont aussi pour les chirurgiens des repères importants permettant de faire la différence entre le normal et le pathologique où la désorganisation « saute aux yeux ». **Le normal et le fonctionnel rejoignent l'esthétique**.

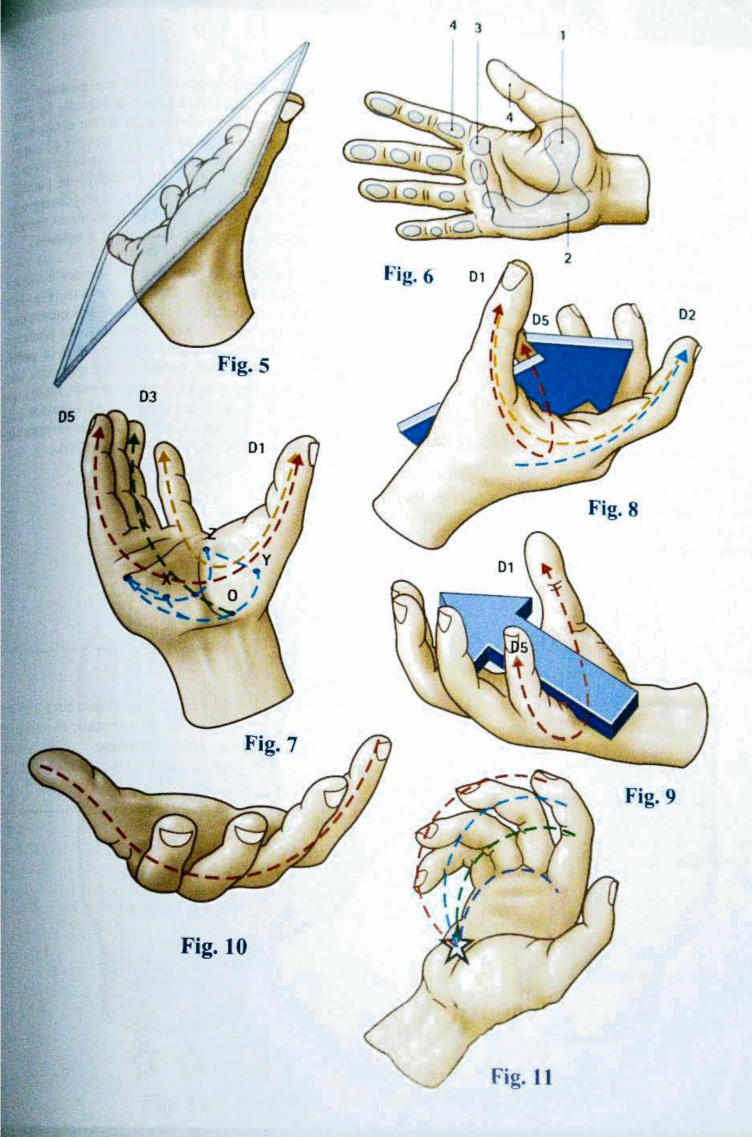


Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7
Fig. 8
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 11

Lors de **l'écartement volontaire** des doigts (Fig. 12), l'axe de chacun des cinq doigts vient converger vers la base de l'éminence thénar en un point qui correspond approximativement au tubercule du scaphoïde, perçu facilement par la palpation. Les mouvements des doigts dans le plan frontal, **mouvements d'adduction-abduction**, ne s'effectuent habituellement pas au niveau de la main, par rapport au plan de symétrie du corps, mais par rapport à l'axe de la main, constitué par le **troisième métacarpien et le médius**; on parle alors de mouvements d'écartement (Fig. 12) et de rapprochement (Fig. 13) des doigts. Pendant ces mouvements, le médius reste pratiquement immobile. Il est cependant possible de lui faire effectuer des mouvements volontaires vers le dehors (abduction vraie, par rapport au plan de symétrie) et vers le dedans (adduction vraie).

Lors du **rapprochement volontaire** des doigts les uns des autres (Fig. 15), les axes des doigts ne sont pas parallèles, mais convergents en un point situé assez loin au-delà du bout de la main. Cela tient au fait que les doigts ne sont pas cylindriques, mais de calibre décroissant de la racine vers la pulpe.

Lorsqu'on laisse les doigts prendre une **position naturelle** (Fig. 14) - position à partir de laquelle on peut effectuer soit leur rapprochement, soit leur écartement - ils sont légèrement écartés l'un par rapport à l'autre, mais leurs axes ne convergent pas tous en un point unique. Dans l'exemple donné ici, il existe un parallélisme entre les trois derniers doigts, et une divergence entre les trois premiers, le médius formant, là encore, l'axe de la main et servant de zone de transition.

Lors de la **fermeture du poing** en laissant étendues les articulations interphalangiennes distales (Fig. 13), les axes des deux dernières phalanges des quatre derniers doigts et l'axe du pouce - sa dernière phalange exceptée - convergent en un point situé à la **partie basse de la gouttière du pouls**. Notez que cette fois, c'est l'axe de l'index qui est longitudinal, tandis que les axes des trois derniers doigts sont d'autant plus obliques qu'on s'éloigne de l'index. Nous verrons plus loin la cause et l'utilité de cette disposition.

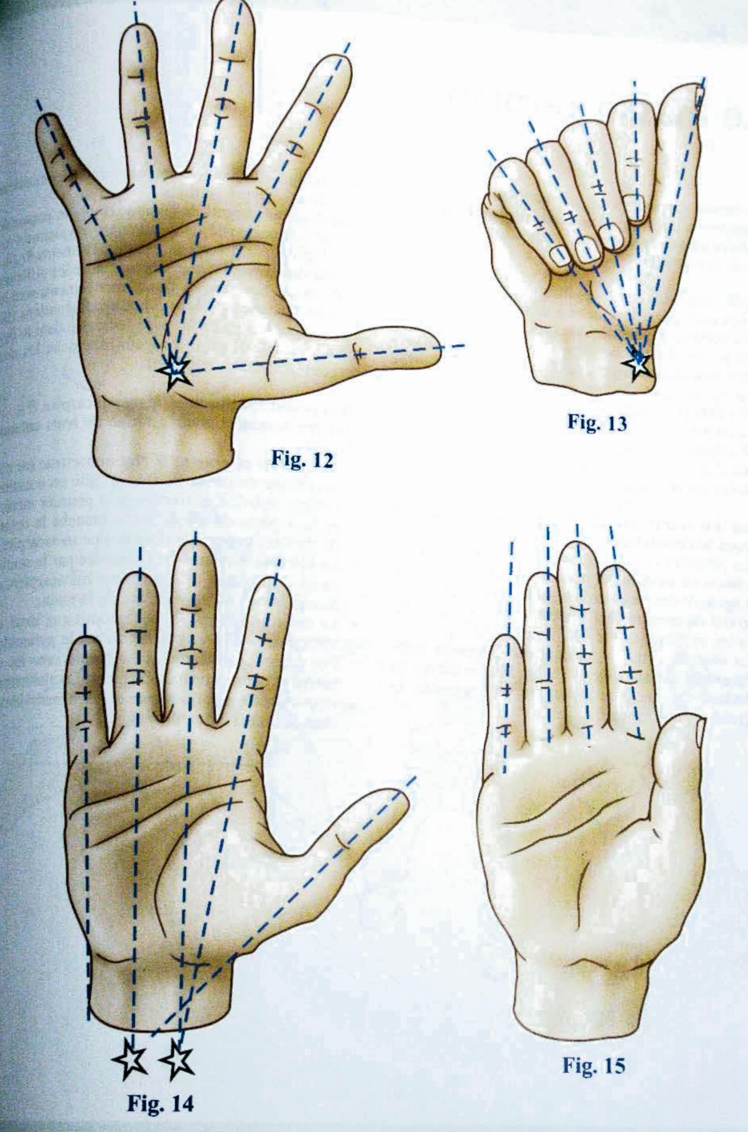


Fig. 12

Fig. 13

Fig. 14

Fig. 15

Le massif carpien

Le massif carpien forme une **gouttière à concavité antérieure**, transformée en **canal** par le **ligament annulaire antérieur du carpe**, tendu d'une berge à l'autre de la gouttière.

Cette disposition en gouttière est bien visible lorsqu'on regarde le squelette de la main, le poignet étant porté en hyperextension (Fig. 16): une radiographie permet d'avoir la même vision. Le rayon visuel se trouve ainsi exactement dans l'axe du canal carpien, dont on reconnaît chacune des berges:

- En dehors: le tubercule du scaphoïde 1 et la crête du trapèze 2;
- En dedans: le pisiforme 3 et l'apophyse unciforme de l'os crochu 4 (ces détails portent le même numéro sur les autres figures).

Dans le sens transversal, le fait est confirmé par deux **coupes horizontales**:

- La première (Fig. 17) passant par la **rangée supérieure ou proximale**, niveau A (Fig. 19): on distingue, de dehors en dedans, le scaphoïde, la tête du grand os encadré par les deux cornes du semi-lunaire, le pyramidal, le pisiforme;
- La seconde (Fig. 18) passant par la **rangée inférieure ou distale**, niveau B (Fig. 19): de dehors en dedans, on rencontre le trapèze, le trapézoïde, le grand os, l'os crochu.

Sur la coupe inférieure, le ligament annulaire antérieur du carpe est figuré en tirets.

Lors des mouvements de creusement de la paume de la main, la concavité de la gouttière carpienne s'accroît légèrement, grâce à de petits mouvements de glissement dans les arthrodies siégeant entre les différents os du carpe. Les moteurs de ces mouvements sont les muscles thénariens (flèche X) et hypothénariens (flèche Y) dont les insertions supérieures tendent le ligament annulaire (Fig. 18), ce qui rapproche les deux berges (contours en pointillé).

Dans le sens longitudinal, le massif carpien (Fig. 19) peut être considéré comme formé **de trois colonnes** (Fig. 20):

- La **colonne externe** a: la plus importante car c'est la **colonne du pouce de Destot**. Elle est constituée par le scaphoïde, le trapèze et le premier métacarpien. À partir du scaphoïde se branche la colonne de l'index: trapézoïde et deuxième métacarpien;
- La **colonne moyenne** b: constituée par le semi-lunaire, le grand os et le troisième métacarpien, elle forme, nous l'avons vu, l'axe de la main;
- La **colonne interne** c: elle aboutit aux deux derniers doigts. Elle est constituée par le pyramidal et l'os crochu, qui s'articule lui-même avec les quatrième et cinquième métacarpiens. Le pisiforme est rapporté en avant du pyramidal et n'intervient pas dans la transmission des efforts.

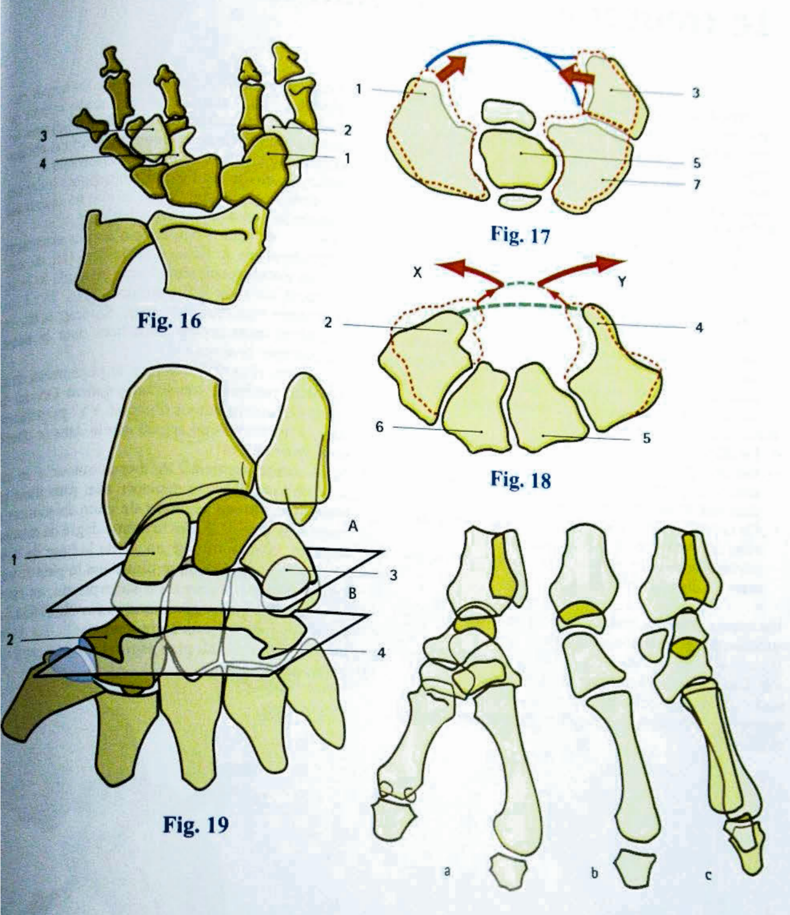


Fig. 16

Fig. 17

Fig. 18

Fig. 19

Fig. 20

Le creusement de la paume

Le creusement de la paume résulte essentiellement des mouvements des quatre derniers métacarpiens (premier métacarpien pour l'instant exclu) par rapport au carpe. Ces mouvements effectués dans les articulations carpo-métacarpiennes, consistent en flexion-extension, de faible amplitude - comme dans toutes les arthrodies. Mais cette amplitude va croissant du deuxième au cinquième métacarpien :

- Lorsque la **main est plate** (Fig. 22 : main vue en bout), les têtes des quatre derniers métacarpiens sont alignées sur une droite **AB** ;
- Mais si **la main se creuse**, la tête des trois derniers métacarpiens avance en flexion (Fig. 21 : main vue de profil) en **A'**, et ce, d'autant qu'on se rapproche du cinquième. Les têtes métacarpiennes se disposent alors suivant une ligne courbe **A'B** (Fig. 22) suivant l'arche transversale métacarpienne.

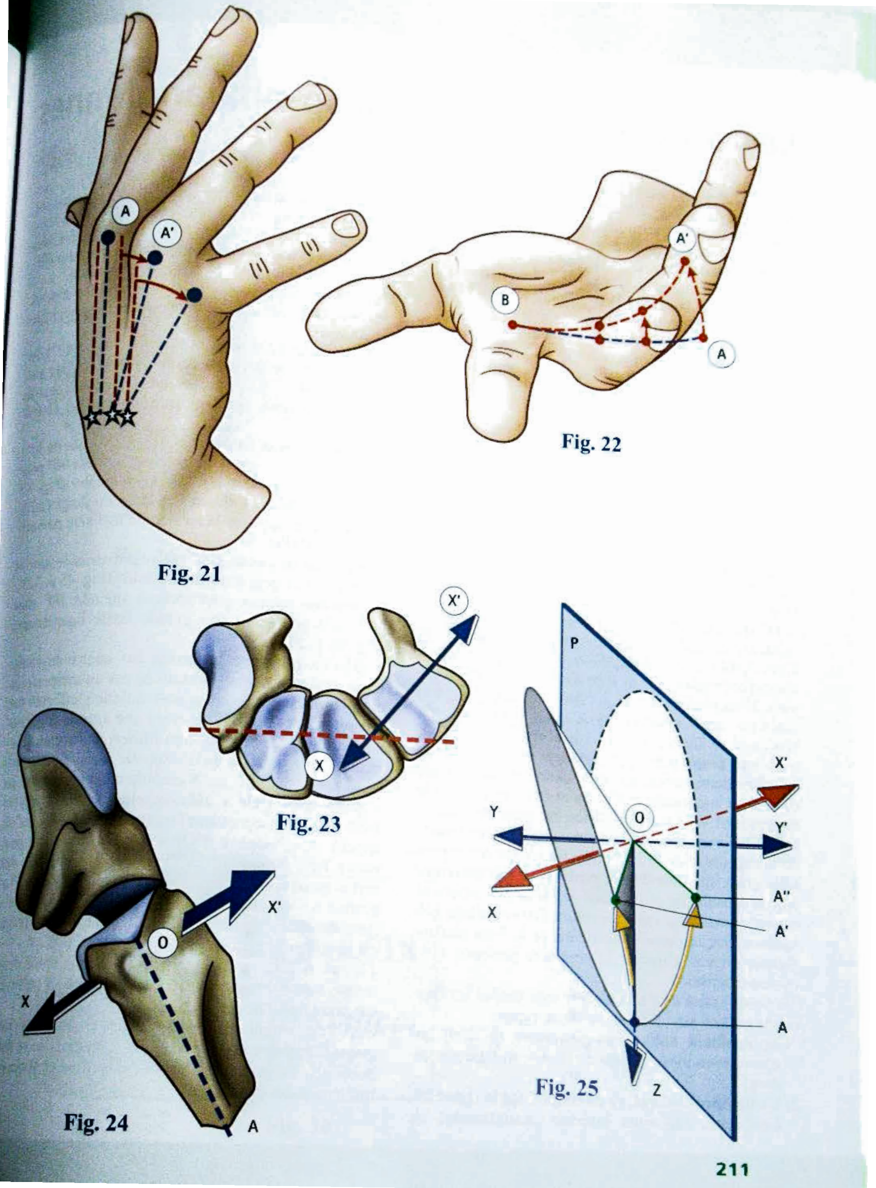
Deux remarques s'imposent :

- La tête du deuxième métacarpien **B** n'avance pratiquement pas : les mouvements de flexion-extension dans l'articulation trapézoïde-deuxième métacarpien sont pour ainsi dire nuls ;
- Par contre, la tête du cinquième métacarpien **A**, animée du mouvement le plus ample (Fig. 22), se porte, non seulement en avant, mais aussi légèrement en dehors, en position **A'**.

Ceci nous amène à étudier **l'articulation entre cinquième métacarpien et os crochu** :

Il s'agit d'une arthrodie (Fig. 24) dont les surfaces sont très légèrement cylindriques et dont l'axe **XX'** présente une double obliquité, ce qui explique les déplacements de la tête du métacarpien dans le sens latéral externe :

- Lorsqu'on regarde la face inférieure du massif carpien (Fig. 23), l'axe **XX'** de la facette interne de l'os crochu est nettement oblique par rapport au plan frontal (ligne pointillée rouge) : il est oblique de dehors en dedans et d'arrière en avant ;
- Tout mouvement de flexion par rapport à cet axe doit donc logiquement porter la tête du cinquième métacarpien en avant et en dehors ;
- L'axe **XX'** de cette articulation n'est pas strictement perpendiculaire à l'axe diaphysaire **OA** du cinquième métacarpien, mais forme un angle **XOA** légèrement inférieur à l'angle droit (Fig. 24). Cette disposition concourt, elle aussi, à porter la tête du cinquième métacarpien en dehors pour la raison géométrique ci-après.
- Ce schéma (Fig. 25) explique le phénomène de la **rotation conique** : lorsqu'un segment **OA** sur la droite OZ tourne autour d'un axe **YY'** perpendiculaire, il va décrire un arc de cercle dans le plan P pour venir en **OA"**.
- Si ce même segment **OA** tourne autour d'un axe **XX'** oblique, il va se déplacer **non plus dans un plan mais sur un segment de cône** de sommet O tangent au plan **P**. Après le même degré de rotation, le point **A** va se trouver en **A'** de la base du cône, et ce point **A'** ne se situe plus dans le plan **P**, mais en avant (sur la figure). En superposant, en esprit, cette démonstration géométrique au schéma de l'articulation (Fig. 24), on comprend que la tête du métacarpien A sorte du plan sagittal pour se porter légèrement en dehors.


A
A'
Fig. 21
A'
B
A
Fig. 22
X'
X
Fig. 23
X'
O
X
A
Fig. 24
P
X'
Y
O
Y'
X
A''
A'
A
Fig. 25
Z

Les articulations métacarpo-phalangiennes

Les articulations métacarpo-phalangiennes sont du **type condylien** (Fig. 26 : articulation métacarpo-phalangienne ouverte par sa face postérieure). Elles possèdent *deux degrés de liberté* :

1. **Flexion-extension**, dans un plan sagittal, autour de l'axe YY' transversal (rouge) ;
2. **Inclinaison latérale**, dans un plan frontal, autour de l'axe XX', antéro-postérieur (bleu).

Elles possèdent *deux surfaces articulaires* :

1) **La tête métacarpienne** A comporte une surface articulaire, *convexe dans les deux sens, plus* étendue et plus large en avant qu'en arrière ;

2) **La base de la première phalange** B est creusée d'une surface, *concave dans les deux sens*, de superficie notablement moindre que celle de la tête métacarpienne. Elle est prolongée en avant par **le fibro-cartilage glénoïdien** 2, pouvant être considéré comme une *surface d'appoint*. C'est une *languette fibreuse* insérée sur le bord antérieur de la base phalangienne, avec cependant une petite incisure 3 qui lui constitue une *charnière*.

En effet, sur une coupe sagittale dans **l'extension** (Fig. 27), la face profonde, cartilagineuse, du **fibro-cartilage glénoïdien** 2 se trouve au contact de la tête métacarpienne. Alors que dans **la flexion** (Fig. 28), le fibro-cartilage *déborde la tête* et, pivotant autour de sa charnière 3, *glisse sur la face antérieure du métacarpien*. Il est évident que si le fibro-cartilage était remplacé par une languette osseuse soudée à la base de la phalange, la flexion serait limitée beaucoup plus tôt par cette butée. Le fibro-cartilage permet donc de concilier deux impératifs contradictoires : une surface de contact augmentée et l'absence de butée limitant le mouvement. Une autre condition est cependant nécessaire à la liberté des mouvements : une laxité suffisante de la capsule et de la synoviale. Ce jeu est rendu possible grâce aux **culs-de-sac postérieur** 4 et **antérieur** 5 de la capsule. *La profondeur du cul-de-sac antérieur est indispensable au glissement du fibro-cartilage glénoïdien.* Sur la partie postérieure de la base phalangienne, on voit s'insérer la languette profonde 6 du tendon extenseur.

De chaque côté de l'articulation sont tendus les ligaments collatéraux. Ils sont de **deux types** *:*

1) un **ligament métacarpo-glénoïdien** (p. 209) qui contrôle les mouvements du fibro-cartilage glénoïdien ;

2) Un **ligament latéral,** vu en coupe 1 sur la figure 26. Les deux ligaments latéraux maintiennent au contact les surfaces articulaires et limitent les mouvements.

Comme leur insertion métacarpienne A ne se situe pas au centre de courbure de la tête (Fig. 29), mais *légèrement en arrière*, il s'ensuit qu'ils sont *détendus dans l'extension* et *tendus dans la flexion* ; la longueur (flèche rouge double) mesure ce degré de tension.

Ceci rend difficiles, sinon *impossibles*, les mouvements de latéralité lorsque la métacarpo-phalangienne est *fléchie*.

Par contre, *dans l'extension* (Fig 31-32, page 207), **les mouvements de latéralité sont possibles** d'une amplitude de 20 à 30° de chaque côté. L'un des ligaments latéraux se tend pendant que l'autre se détend (Fig. 32).

L'amplitude de la flexion (Fig. 29) est voisine de 90°, mais il faut noter que si elle atteint tout juste 90° pour l'index, *elle va croissant jusqu'au cinquième* (Fig. 43 p. 213). De plus, la flexion isolée d'un doigt (ici le médius) est limitée par la tension du *ligament palmant inter-digital* (Fig. 44).

L'amplitude de **l'extension active** est *variable suivant les sujets* : elle peut atteindre 30 à 40° (Fig. 45 p. 213). **L'extension passive** peut presque atteindre 90° chez les sujets possédant une grande laxité ligamentaire (Fig. 46 p. 213).

Lorsqu'on considère la flexion des quatre segments d'une chaîne digitale – constituée par un métacarpien et trois phalanges – on constate qu'elle s'effectue par **enroulement** (fig. 330) suivant une *spirale logarithmique*, ainsi que l'a démontré ***Littler***, chirurgien américain. Cette spirale, qu'on appelle aussi *équi-angulaire* est construite sur l'emboîtement successif de **« Rectangles d'Or »**, ainsi appelés car la proportion entre leur longueur et leur largeur est de 1,618, qu'on appelle le **« Nombre d'Or »**. Ce nombre ϕ (on prononce Phi), connu depuis Platon, et qui possède des vertus quasi ésotériques – on l'appelle la « Divine Proportion » – est issue de la « la ***série de Fibbonacci*** » (mathématicien italien 1180-1250), où chaque terme est la somme des deux précédents : 1 – 2 – 3 - 5 - 8 - 13, etc. À partir du 25e terme, le rapport entre deux termes successifs est fixe et constant : 1,618 (essayez sur votre ordinateur !).

Ceci veut simplement dire que les rapports de longueur des quatre segments osseux sont dans cette proportion… En pratique, c'est une condition du bon enroulement des phalanges !

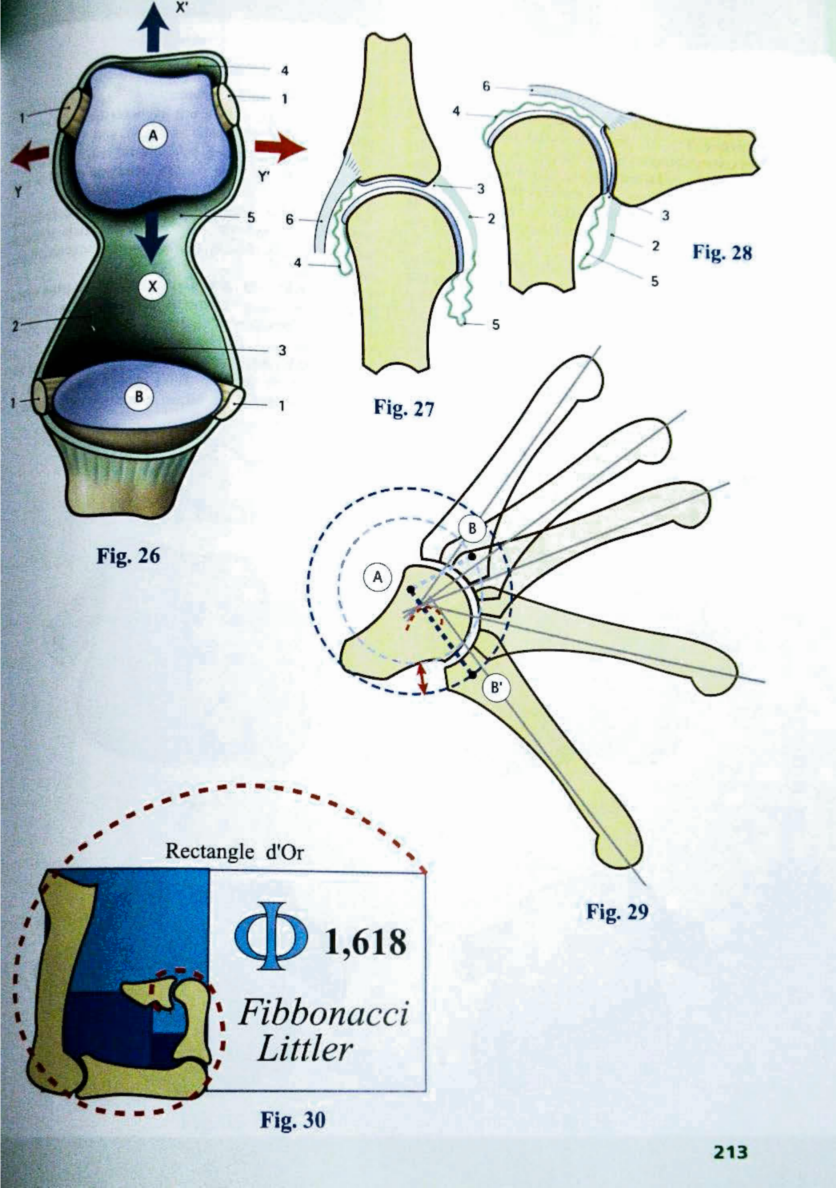


Fig. 26

Fig. 27

Fig. 28

Fig. 29

Fig. 30

Dans l'**extension** de **l'articulation métacarpo-phalangienne** (Fig. 31 : coupe frontale), les ligaments latéraux sont détendus et équilibrés, ce qui permet les mouvements de **latéralité** (Fig. 32) : l'un se tend alors que l'autre se détend. Les **muscles interosseux** sont les moteurs de ces mouvements. À l'inverse, dans la flexion, la tension des ligaments latéraux assure sa stabilisation de l'articulation.

Une conséquence importante de cette disposition, c'est que les articulations métacarpo-phalangiennes ne doivent **jamais être immobilisées en extension** sous peine de raideur quasi impossible à récupérer : la détente des ligaments latéraux permet leur rétraction, ce qui ne peut survenir en flexion puisqu'ils sont déjà tendus au maximum.

La **forme des têtes métacarpiennes** et la longueur des ligaments, ainsi que leur direction, jouent un rôle essentiel, d'une part dans la flexion oblique des doigts (voir plus loin), d'autre part, selon R. Tubiana, dans le mécanisme des déviations cubitales lors du processus d'arthrite rhumatoïde.

La **tête du IIe métacarpien** (Fig. 33 : vue inférieure du côté droit) est **nettement asymétrique** par son important épaulement postéro-interne, son aplatissement externe ; le ligament latéral interne est plus épais et plus long que l'externe dont l'insertion est plus postérieure.

La **tête du IIIe métacarpien** (Fig. 34) possède une **asymétrie semblable à celle du IIe** mais toutefois moins marquée ; ses ligaments ont des caractéristiques identiques.

La **tête du IVe métacarpien** (Fig. 35) est **plus symétrique** avec des épaulements dorsaux égaux, les ligaments latéraux sont d'épaisseur et d'obliquité identiques, l'externe étant légèrement plus long.

La **tête du Ve métacarpien** (Fig. 36) possède une **asymétrie inverse** de celle de l'index et du médius ; les ligaments latéraux se présentent comme ceux de la IVe tête.

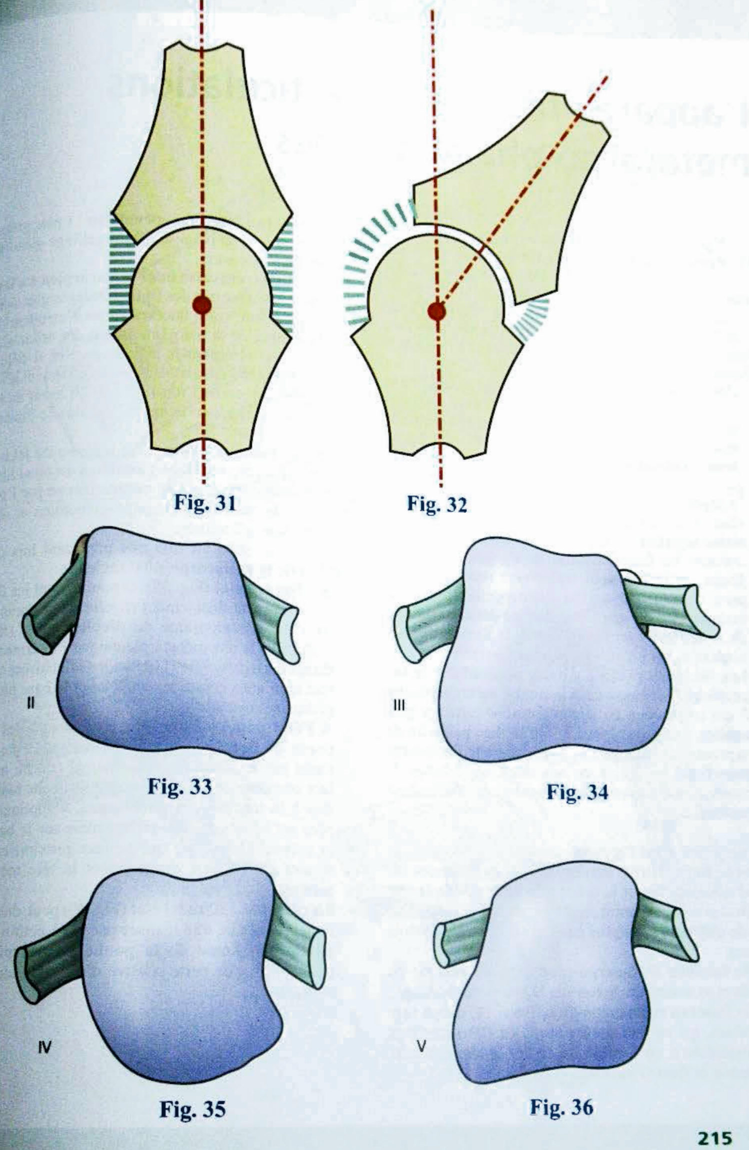


Fig. 31

Fig. 32

Fig. 33

Fig. 34

Fig. 35

Fig. 36

L'appareil fibreux des articulations métacarpo-phalangiennes

Les ligaments latéraux de la métacarpo-phalangienne s'intègrent dans un **appareil fibreux complexe** qui suspend et centre les tendons extenseurs et fléchisseurs.

Sur une **vue perspective postéro-supérieure et latérale de l'articulation** (Fig. 37), on reconnaît les tendons encadrant en arrière et en avant la métacarpo-phalangienne :

- L'**extenseur commun** 1, qui, à la face dorsale de la capsule détache son **expansion profonde** a s'insérant sur la base de la première phalange ; ensuite, le tendon se divise en une **bandelette médiane** b et **deux bandelettes latérales** c, qui reçoivent les expansions des interosseux (non figurées). Peu avant le départ de l'expansion profonde, on voit se détacher des bords latéraux de l'extenseur des **bandelettes sagittales** d supposées ici transparentes, qui croisent les faces latérales de l'articulation et se fixent sur le **ligament transverse inter-métacarpien** 4 ; ainsi, le tendon extenseur se trouve-t-il maintenu dans l'axe sur la surface dorsale convexe de la tête métacarpienne, lors de la flexion de l'articulation, ce qui est une position instable ;
- **Les fléchisseurs des doigts, le profond** 2 et **le superficiel** 3, engagés dans la **poulie métacarpienne** 5 qui commence en amont du fibro-cartilage glénoïdien 6 et se prolonge 5' sur la face palmaire de la première phalange **P1** : à ce niveau, le fléchisseur superficiel se divise en ses deux bandelettes 3' avant d'être perforé par le tendon du fléchisseur profond 2.

On distingue aussi l'appareil capsulo-ligamentaire : **la capsule articulaire** 7 renforcée par : **le ligament latéral** qui s'insère sur le **tubercule latéral** 8 de la tête métacarpienne, excentré en arrière de la ligne des centres de courbure (voir plus haut) et se constitue en trois parties :

1) Un **faisceau métacarpo-phalangien** 9 oblique en bas et en avant vers la base de la première phalange ;
2) Un **faisceau métacarpo-glénoïdien** 10, dirigé vers l'avant, qui se fixe sur les bords du fibro-cartilage glénoïdien 6 qu'il applique contre la tête métacarpienne et dont il assure la stabilité
3) Un **faisceau phalango-glénoïdien** 11 plus grêle effectuant le « rappel » du fibro-cartilage glénoïdien lors de l'extension.

Le **ligament transverse inter-métacarpien** 4 s'insère sur les bords adjacents des fibro-cartilages glénoïdiens voisins, de telle sorte que ses fibres s'étendent d'un bord à l'autre de la main, au niveau des articulations métacarpo-phalangiennes avec lesquelles il délimite des tunnels ostéo-fibreux dans lesquels passent les tendons des interosseux (non figurés) ; en avant du ligament transverse glisse le tendon du muscle lombrical (non figuré).

La poulie métacarpienne 5, qui s'insère sur les bords latéraux du fibro-cartilage glénoïdien est ainsi littéralement suspendue à la tête métacarpienne par l'intermédiaire du faisceau métacarpo-glénoïdien et du fibro-cartilage glénoïdien.

Ce dispositif joue un rôle très important lors de la **flexion de la métacarpo-phalangienne** :

- **À l'état normal** (Fig. 38), la poulie, dont les fibres se retroussent distalement (flèche rouge), transmet toute la « composante de décollement » (flèche blanche) à la tête métacarpienne par l'intermédiaire du faisceau glénoïdien : les tendons fléchisseurs restent appliqués contre le squelette et la base phalangienne reste stable ;
- **À l'état pathologique** (Fig. 39), lorsque les faisceaux du ligament latéral sont distendus puis détruits par le processus rhumatismal (flèche noire), la « composante de décollement » (flèche blanche) due à la traction des fléchisseurs, s'applique non plus sur la tête métacarpienne mais sur la base de la première phalange qui se luxe proximalement, faisant alors saillir exagérément la tête métacarpienne ;
- **La correction d'un tel état** (Fig. 40) peut, dans une certaine mesure être réalisée par la **résection de la partie proximale de la poulie métacarpienne**, mais au prix de perte relative d'efficacité des fléchisseurs.

Fig. 37

Fig. 38

Fig. 39

Fig. 40

Les tendons extenseurs communs (Fig. 41) qui convergent à la face dorsale du poignet sont en effet fortement sollicités en dedans (flèches blanches) du côté ulnaire, en raison de **l'angle de distraction** formé entre le métacarpien et la première phalange, plus important pour l'**auriculaire** 14° et l'**annulaire** 13° que pour l'**index** 8° et surtout le **médius** 4°. Seule la **bandelette sagittale de l'extenseur**, située du côté radial, s'oppose à cette composante de luxation cubitale du tendon extenseur sur la face dorsale convexe de la tête métacarpienne.

Lors du **processus rhumatismal** (Fig. 42 : vue en coupe au niveau des têtes métacarpiennes) les lésions dégénératives détruisent non seulement les **ligaments latéraux** 10 ce qui « décroche » la **plaque palmaire** 6 ou fibro-cartilage glénoïdien sur lequel s'amarre la **poulie métacarpienne** 5 contenant les fléchisseurs profond 2 et superficiel 3, mais encore détendent ou rompent (flèche noire) la **bandelette sagittale** d du côté radial, ce qui permet le déplacement du **tendon extenseur** 1 du côté cubital et sa « luxation » dans les **vallées inter-métacarpiennes**. Cet espace inter-métacarpien ne contient à l'état normal que les **tendons des interosseux** 12 du côté dorsal par rapport au **ligament inter-métacarpien** 4, alors que le **tendon du lombrical** 13 est situé du côté palmaire.

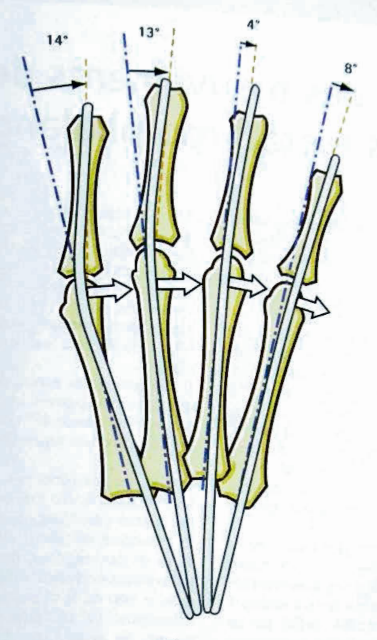


Fig. 41

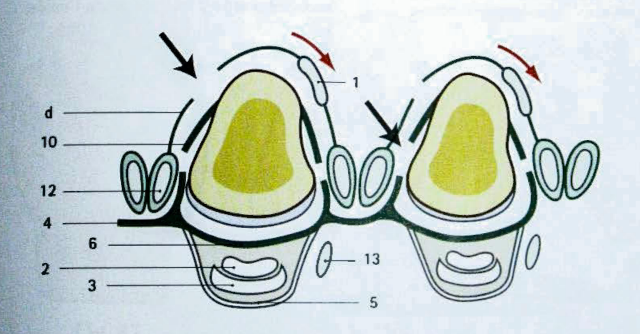


Fig. 42

L'amplitude des mouvements des articulations métacarpo-phalangiennes

L'amplitude de la flexion des métacarpo-phalangiennes (Fig. 43) est voisine de 90° ; mais il faut noter que si elle atteint tout juste 90° pour l'index, elle va croissant jusqu'au cinquième. De plus, la flexion isolée d'un doigt, ici le médius, est limitée (Fig. 44) par la tension du ligament palmant inter-digital.

L'amplitude de l'extension active est variable suivant les sujets : elle peut atteindre 30 à 40° (Fig. 45). **L'extension passive** peut presque atteindre 90° chez les sujets possédant une grande laxité ligamentaire (Fig. 46).

De tous les doigts, sauf le pouce, l'**index** est celui qui possède (Fig. 47) la plus grande amplitude de mouvement dans le sens latéral **30°** et, comme il est facile de le mouvoir isolément, on peut à son propos parler d'abduction **A** et d'adduction **B**. C'est à ce privilège de mobilité que l'index doit son nom : **index** signifie **indicateur.**

En combinant à des degrés divers des mouvements (Fig. 48) d'abduction **A** - adduction **B** et d'extension **C** - flexion **D**, l'index peut exécuter des **mouvements de circumduction**. Ces mouvements restent limités à l'intérieur du **cône de circumduction** défini par sa base ACBD et son sommet l'articulation métacarpo-phalangienne. Ce cône est aplati transversalement du fait de la plus grande amplitude des mouvements de flexion-extension. Son axe (flèche blanche) représente la **position d'équilibre** - ou encore de fonction.

Les articulations du type condylien ne possèdent pas normalement de troisième degré de liberté (rotation longitudinale). C'est le cas pour les articulations métacarpo-phalangiennes des quatre derniers doigts qui ne possèdent pas de rotation longitudinale active. Cependant, grâce à la laxité ligamentaire, une certaine amplitude de **rotation axiale passive** est possible au niveau de l'index. Son amplitude est de **60°** environ (Roud).

Il faut noter qu'au niveau de l'index, l'amplitude de la rotation axiale passive interne - ou pronation est nettement plus grande **45°** que l'amplitude de la rotation axiale externe en supination qui est presque nulle.

Si elles ne possèdent pas de mouvement de rotation longitudinale active individualisé, les métacarpo-phalangiennes possèdent cependant, du fait de l'asymétrie du condyle métacarpien et de l'inégalité de tension et de longueur des ligaments latéraux, un mouvement de **rotation longitudinale automatique**, dans le sens de la supination. Ce mouvement, dont le mécanisme est identique à celui de l'inter-phalangienne du pouce, est d'autant plus marqué qu'il concerne un doigt plus interne ; il est donc maximum pour l'auriculaire où il s'intègre dans le mouvement d'opposition symétrique à celui du pouce de l'articulation métacarpo-phalangienne de l'index.

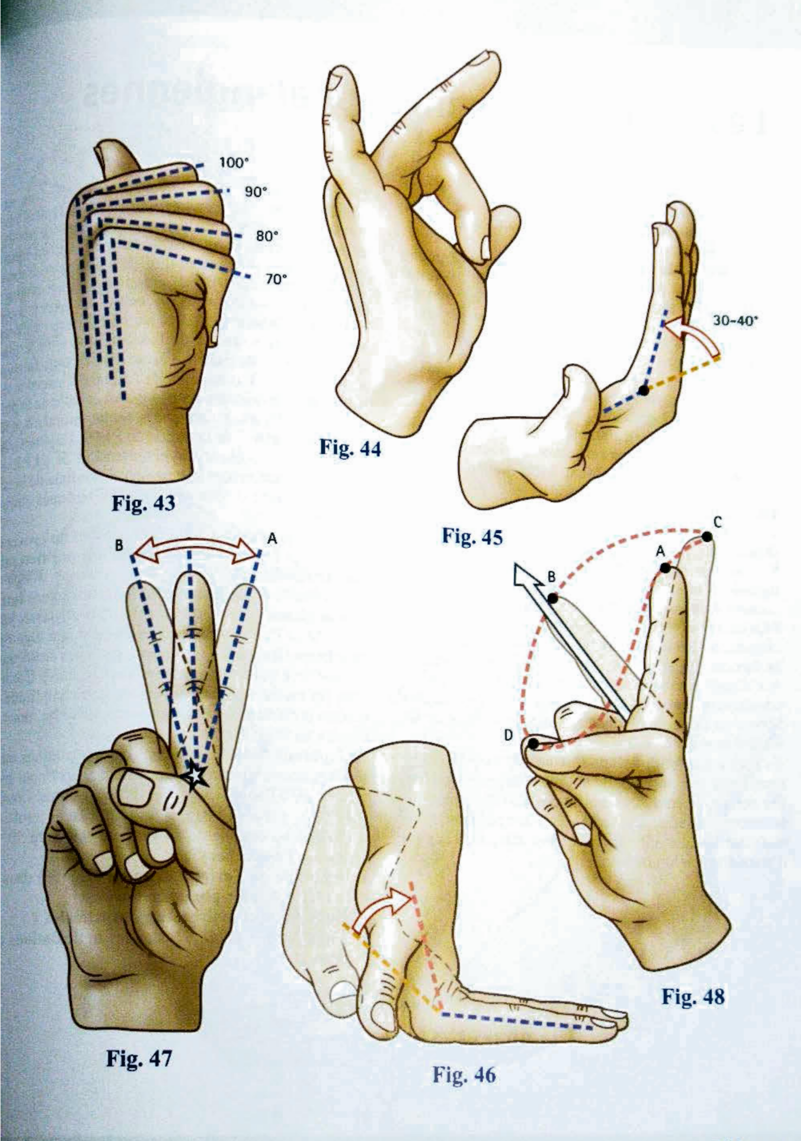


Fig. 43

Fig. 44

Fig. 45

Fig. 47

Fig. 46

Fig. 48

Les articulations inter-phalangiennes

Les articulations inter-phalangiennes sont de **type trochléen** et possèdent **un seul degré de liberté**:

- La **tête de la phalange** A a la forme d'une poulie (Fig. 49) et possède un seul axe XX', transversal (Fig. 50), autour duquel s'effectuent les mouvements de flexion-extension, dans un plan sagittal;
- La **base de la phalange distale** B, qui lui correspond, est creusée de deux cavités glénoïdes qui s'appliquent sur les joues de la trochlée;
- La crête mousse qui sépare les deux cavités glénoïdes vient se loger dans la gorge de la poulie.

Comme pour les articulations métacarpo-phalangiennes, et pour les mêmes raisons mécaniques, il existe un **fibro-cartilage glénoïdien** 2 (les numéros se correspondent avec la figure 53).

Dans la **flexion** (Fig. 51), le fibro-cartilage glénoïdien vient glisser sur la face antérieure de la phalange proximale.

Sur une **vue latérale** (Fig. 52), on distingue, outre les **ligaments latéraux** 1, les **expansions du tendon extenseur** 6 et les **ligaments phalango-glénoïdiens** 7.

Plus encore que pour les articulations métacarpo-phalangiennes, **les ligaments latéraux sont tendus dans la flexion**; en effet (Fig. 50), la poulie phalangienne A s'élargit notablement en avant, ce qui augmente la tension des ligaments et donne une assise plus large à la base de la phalange distale. Les mouvements de latéralité sont donc nuls dans la flexion.

Ils sont aussi **tendus dans l'extension complète** qui représente une **position de stabilité latérale absolue**. Par contre, ils sont détendus en position de flexion intermédiaire, qui ne doit jamais être une position d'immobilisation car elle favorise leur rétraction, cause d'enraidissement ultérieur.

Un autre facteur d'enraidissement en flexion est constitué par la **rétraction des « freins de l'extension »**. Ces formations ont été décrites par les auteurs anglophones au niveau des articulations inter-phalangiennes proximales (Fig. 53: vue palmaire externe et supérieure d'une articulation inter-phalangienne proximale) sous le nom de ***check rein ligaments***: ils sont constitués par un faisceau de fibres longitudinales **8** tendu à la face antérieure de la plaque palmaire **2** de part et d'autre des tendons fléchisseurs profond **11** et superficiel **12** entre l'insertion de la poulie de la deuxième phalange **10** et celle de la première (non figurée), formant la limite latérale des **fibres diagonales 9** de la poulie de l'I.P.P. Ces freins de l'extension empêchent l'hyperextension de l'I.P.P. et, par leur rétraction sont une cause primordiale de la raideur en flexion; ils doivent alors être réséqués chirurgicalement.

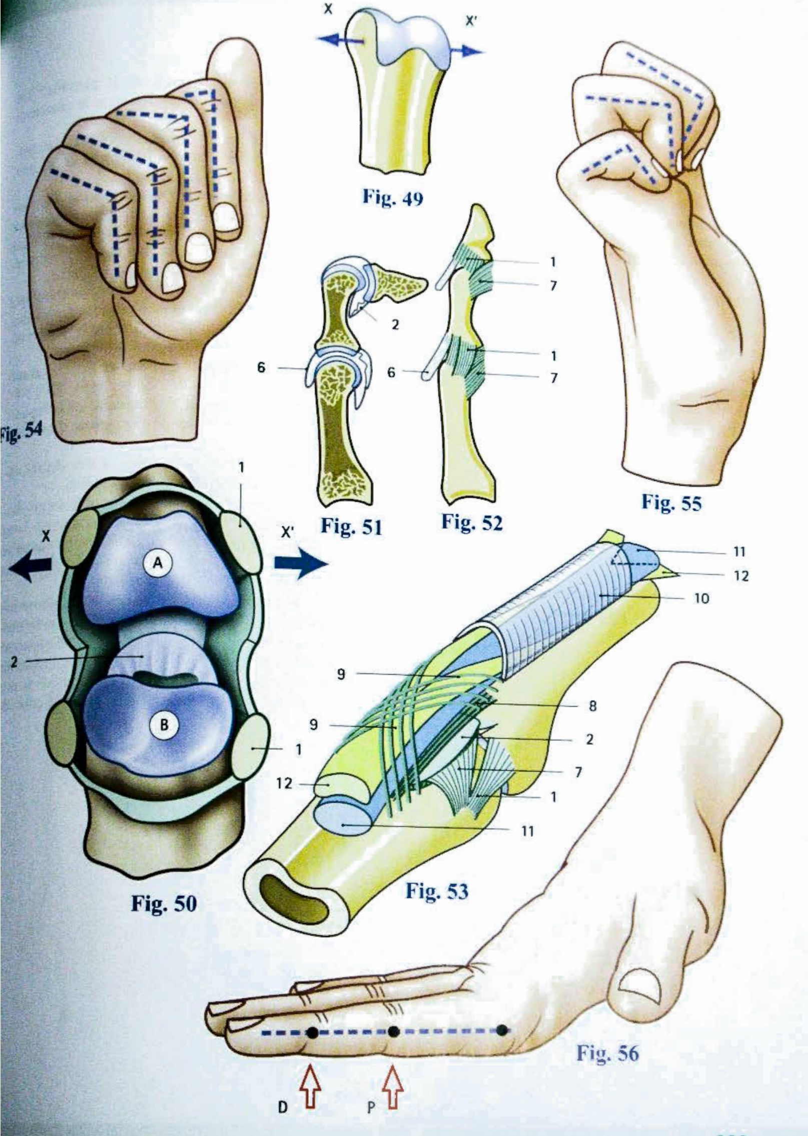
Au total, les inter-phalangiennes, surtout les proximales, doivent être immobilisées dans une **position proche de l'extension**.

L'amplitude de la flexion dans les articulations **inter-phalangiennes proximales** (Fig. 54) **dépasse 90°**: donc P2 et P1 forment entre elles un angle aigu (sur ce schéma, les phalanges ne sont pas vues strictement de profil, ce qui fait paraître les angles obtus). Comme pour les métacarpo-phalangiennes, cette amplitude de flexion croît du deuxième au cinquième doigt, pour atteindre 135° au niveau de l'auriculaire.

L'amplitude de la flexion dans les articulations inter-phalangiennes distales (Fig. 55) est légèrement inférieure à 90°: l'angle entre P2 et P3 reste obtus. Comme pour les précédentes, cette amplitude croît du deuxième au cinquième doigt, pour atteindre 90° au niveau de l'auriculaire.

L'amplitude de l'extension active (Fig. 56) dans les **articulations inter-phalangiennes** est:

- **Nulle** dans les **articulations proximales** P;
- **Nulle** ou très faible **5°** dans les **articulations distales** D.


X
X'
Fig. 49
1
7
2
1
6
6
7
Fig. 54
1
Fig. 51
Fig. 52
Fig. 55
X
X'
A
11
12
10
2
9
8
B
9
2
1
7
12
1
11
Fig. 50
Fig. 53
Fig. 56
D
P

L'extension passive est nulle au niveau de l'inter-phalangienne proximale (Fig. 57), mais assez marquée **30°** dans l'inter-phalangienne distale.

Les articulations inter-phalangiennes ne possédant qu'un seul degré de liberté, il n'existe pas à leur niveau de mouvements de latéralité actifs. Il existe quelques **mouvements passifs de latéralité** pour l'inter-phalangienne distale (Fig. 58), par contre l'inter-phalangienne proximale est remarquablement stable latéralement, ce qui rend compte de la gêne entraînée par une rupture d'un ligament latéral à son niveau.

Un point important est le **plan dans lequel s'effectue la flexion** pour chacun des quatre derniers doigts (Fig. 59):

- L'index fléchit directement **dans un plan sagittal** P, vers la base de l'éminence thénar;
- Or, nous avons vu (Fig. 13) que dans la flexion des doigts, leurs axes convergent en un point situé à la partie basse de la gouttière du pouls. Il faut donc, pour que ceci se réalise, que les trois derniers doigts fléchissent, non pas dans un plan sagittal comme l'index, mais **dans une direction d'autant plus oblique qu'il s'agit d'un doigt plus interne**;
- Pour l'auriculaire et l'annulaire, cette direction, oblique, est donnée par les flèches vers l'étoile. Grâce à cette flexion oblique, les doigts les plus internes de **s'opposer au pouce aussi bien que l'index.**

Comment ce type de flexion est-il possible? Un schéma avec des bandes de carton peut le démontrer (Fig. 60):

- Une étroite bande de carton a figure la chaîne articulaire d'un doigt: le métacarpien M et les trois phalanges (P1, P2, P3);
- Si la pliure, représentant l'axe de flexion d'une articulation inter-phalangienne, est **perpendiculaire** XX" à l'axe de la bande, la phalange va se fléchir directement dans le plan sagittal d: elle viendra recouvrir exactement la phalange sus-jacente;
- Par contre, si la pliure est **très légèrement oblique** en dedans XX', la flexion ne s'effectuera plus dans le plan sagittal et la phalange fléchie b viendra déborder en dehors la phalange sus-jacente;
- Une très faible obliquité de l'axe de flexion est suffisante, car elle est multipliée par trois XX', YY', ZZ', si bien que lorsque l'auriculaire est complètement fléchi **c,** son obliquité lui permet d'atteindre le pouce;
- Cette démonstration est valable, à des degrés décroissants, pour l'annulaire et le médius.

Dans la réalité, les axes de flexion des métacarpo-phalangiennes et des inter-phalangiennes ne sont pas fixes et immuables: perpendiculaires en extension complète ils deviennent progressivement obliques au cours même de la flexion; ils sont **évolutifs**.

L'évolutivité des axes de flexion des articulations des doigts est due à **l'asymétrie des surfaces articulaires métacarpiennes** (voir plus haut) et phalangiennes et à la **mise en tension différentielle des ligaments latéraux** ainsi que nous le verrons à propos de la métacarpo- phalangienne et de l'inter-phalangienne du pouce.

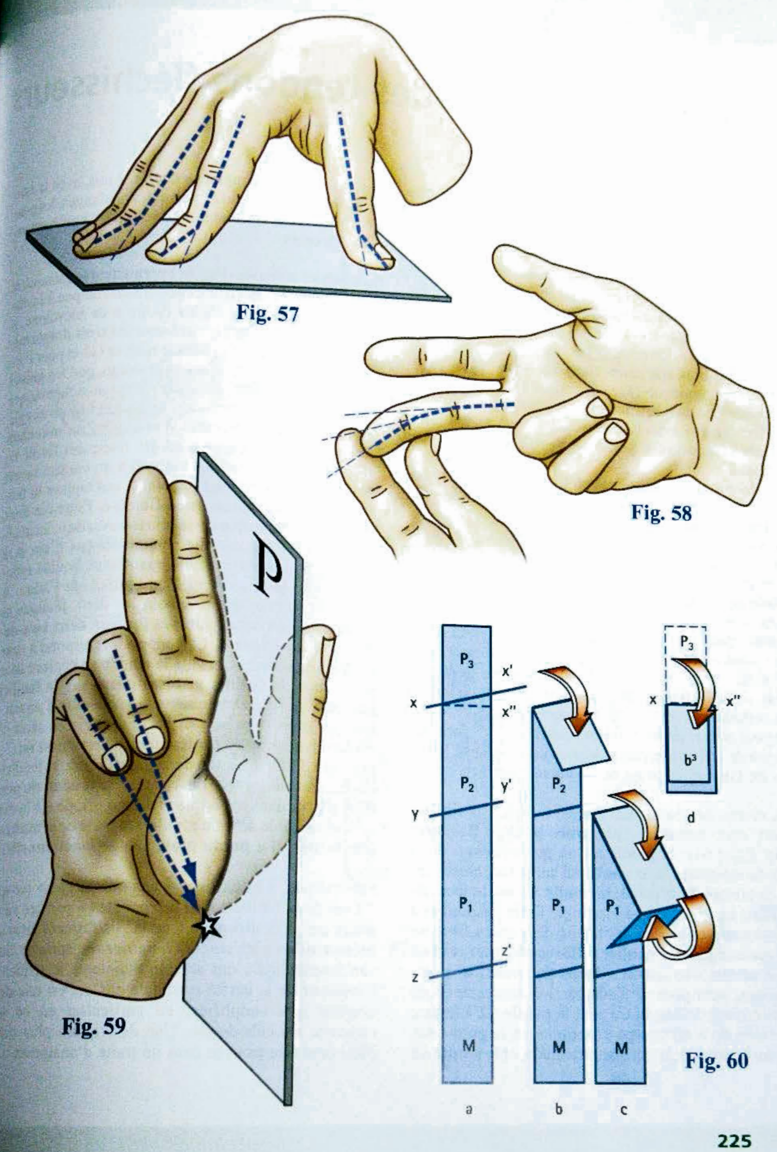


Fig. 57

Fig. 58

Fig. 59

Fig. 60

Coulisses et gaines des tendons fléchisseurs

Pour parcourir les portions concaves de leur long trajet, les tendons doivent être maintenus contre le squelette par des **coulisses fibreuses**, sinon, sous l'effet de la tension, ils prendraient la **corde de l'arc squelettique**, ce qui les rendrait inefficaces du fait de leur allongement relatif par rapport au squelette.

La **première coulisse ostéo-fibreuse** est le **canal carpien** (Fig. 62 d'après Rouvière) par lequel passent (flèche rouge) tous les tendons fléchisseurs qui se rendent de l'avant-bras à la main. Entre les deux berges de la gouttière carpienne (Fig. 61 : main transparente) est étendue une bande fibreuse, le **ligament annulaire antérieur du carpe** LAAC. Ainsi se trouve constituée **la plus importante poulie ostéo-fibreuse** du corps humain.

Sur la **coupe du canal carpien** (Fig. 63), on voit se disposer en deux plans des tendons du ***flexor communis superficialis*** (fléchisseur superficiel) **2** et du ***flexor communis profundus*** (fléchisseur profond) **3**, ainsi que le tendon du ***flexor pollicis longus*** (long fléchisseur propre du pouce) **4**. Le tendon du ***flexor carpi radialis*** (grand palmaire) **5** passe dans un compartiment spécial du canal carpien pour s'insérer sur le deuxième métacarpien PL (Fig. 62). Du côté interne, non compris dans le canal carpien, le *flexor carpi ulnaris* FCU (Fig. 62) vient se fixer sur le pisiforme. Le **nerf médian 6** (Fig. 63) passe lui aussi dans le canal, où il peut en certaines circonstances se trouver à l'étroit, ce qui ne peut arriver au **nerf ulnaire** (cubital) **7** qui, accompagné de son artère, passe dans un canal spécial, le canal de **Guyon**, en avant du ligament annulaire.

Au niveau de chacun des doigts, les tendons fléchisseurs sont maintenus par **trois poulies fibreuses** (Fig. 61 et 64) : la **poulie A1** un peu au-dessus de la tête du métacarpien, la **poulie A3** sur la face antérieure de la première phalange, la **poulie A5** sur la face antérieure de la deuxième phalange. Entre les poulies à fibres transversales, la continuité de la gaine fibreuse est assurée par des **poulies à fibres obliques et croisées**, passant « en sautoir » devant l'articulation, moins épaisses, pour pouvoir s'adapter aux mouvements de flexion des phalanges. Ce sont la **poulie A2** à la face palmaire de la métacarpo-phalangienne, la **poulie A4**, devant l'inter-phalangienne proximale, et la **poulie A5** devant l'inter-phalangienne distale. Ainsi, avec la face antérieure, légèrement concave des phalanges, les poulies constituent (cartouche) de véritables **coulisses ostéo-fibreuses**.

Les **gaines séreuses** (Fig. 61) permettent le glissement des tendons à l'intérieur des coulisses, un peu à la manière des gaines des câbles de frein de bicyclette. Il existe une gaine digitale au niveau des **trois doigts médians** : pour l'index **G2** pour le majeur **G3** et pour l'annulaire **G4**. C'est pour ces trois doigts que les **gaines digitales** ont leur structure la plus schématique (Fig. 65 : schéma simplifié) : le tendon t (pour simplifier, un seul a été figuré) est entouré d'un **manchon séreux** (dont une partie a ici été réséquée) formé de deux feuillets : un feuillet viscéral **a** au contact même du tendon et un feuillet pariétal **b** qui tapisse la face profonde de la coulisse ostéo-fibreuse. Entre ces deux feuillets se trouve une cavité close virtuelle **c**, ici anormalement dilatée, car elle ne contient pas d'air, et, à l'état normal, une très faible quantité de liquide synovial facilite le glissement d'un feuillet sur l'autre. À chaque extrémité du manchon, les deux feuillets se continuent l'un dans l'autre en formant **deux culs-de-sac péri-tendineux d**. La coupe **A** correspond à cette disposition simple. Lorsque le tendon se déplace dans sa coulisse, **le feuillet viscéral glisse sur le feuillet pariétal**, un peu comme se meut la chenille d'un tracteur par rapport au sol : sa partie supérieure seule se déplace par rapport à l'inférieure, adhérente au sol. Si, par suite d'une infection de la gaine, les deux feuillets deviennent adhérents l'un à l'autre, **le tendon ne peut plus glisser** dans sa coulisse : il est « grippé » à la manière d'un câble de frein rouillé. On parle de **symphyse tendineuse. Il a perdu toute valeur fonctionnelle.**

Par endroits, à la partie moyenne de la gaine (coupe **B**), les deux feuillets sont « repoussés » par des vaisseaux qui se destinent au tendon ; ils forment ainsi un **méso-tendon e** les ***vincula tendinorum***, sorte de cloison longitudinale qui semble maintenir le tendon à l'intérieur de la cavité synoviale **c**. Ceci est une description très simplifiée, en particulier en ce qui concerne les culs-de-sac. Une description plus complète peut être trouvée dans un traité d'anatomie.

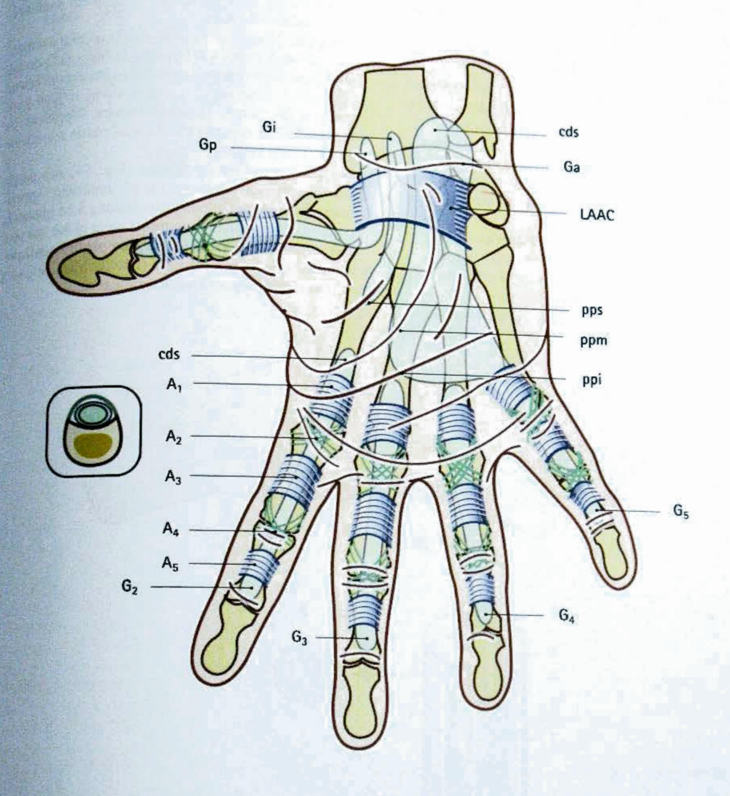


Fig. 61

Au niveau de la paume de la main, les tendons glissent dans **trois gaines carpiennes** (Fig. 61) qui sont, de dehors en dedans :

- La **gaine radio-palmaire Gp**, entourant le ***flexor pollicis longus*** (long fléchisseur du pouce), qui se continue avec la gaine digitale du pouce avec laquelle elle communique largement ;
- La **gaine moyenne Gi** annexée au tendon du ***flexor indicis profondus*** (fléchisseur profond de l'index), ne communiquant pas avec sa gaine digitale ;
- La **gaine cubito-palmaire Ga** dont le cul-de-sac supérieur cds remonte jusqu'à la face antérieure du poignet. Elle n'entoure pas complètement les tendons et pousse, entre les deux plans tendineux, trois culs-de-sac (Fig. 63) :
  - en avant, le **cul-de-sac pré-tendineux 8 ;**
  - en arrière, le **cul-de-sac rétro-tendineux 10** ;
  - et entre les tendons superficiels et profonds, le **cul-de-sac inter-tendineux 9**.

La gaine cubito-palmaire se prolonge (Fig. 61) dans la gaine digitale du cinquième doigt, avec laquelle elle communique.

Sur le plan topographique, il est important de noter (Fig. 61) :

- Les culs-de-sac supérieurs des gaines carpiennes débordent en haut largement le ligament annulaire vers l'avant-bras ;
- Les gaines digitales des trois doigts médians remontent presque jusqu'à mi-paume et leurs culs-de-sac supérieurs correspondent au **pli palmaire inférieur ppi** pour le troisième et quatrième et **moyen ppm** pour le deuxième ; le **pli palmaire supérieur** ou thénarien **pps** correspond dans sa partie supérieure au troisième rayon ;
- Les plis palmaires de flexion (Fig. 64) des doigts (flèches rouges) sont - sauf le pli supérieur – proximaux par rapport à leur articulation ; à ce niveau la peau est directement au contact de la gaine qui peut y être **inoculée d'emblée par une piqûre septique**.

Noter aussi que les plis dorsaux (flèches blanches) sont proximaux par rapport à leur articulation.

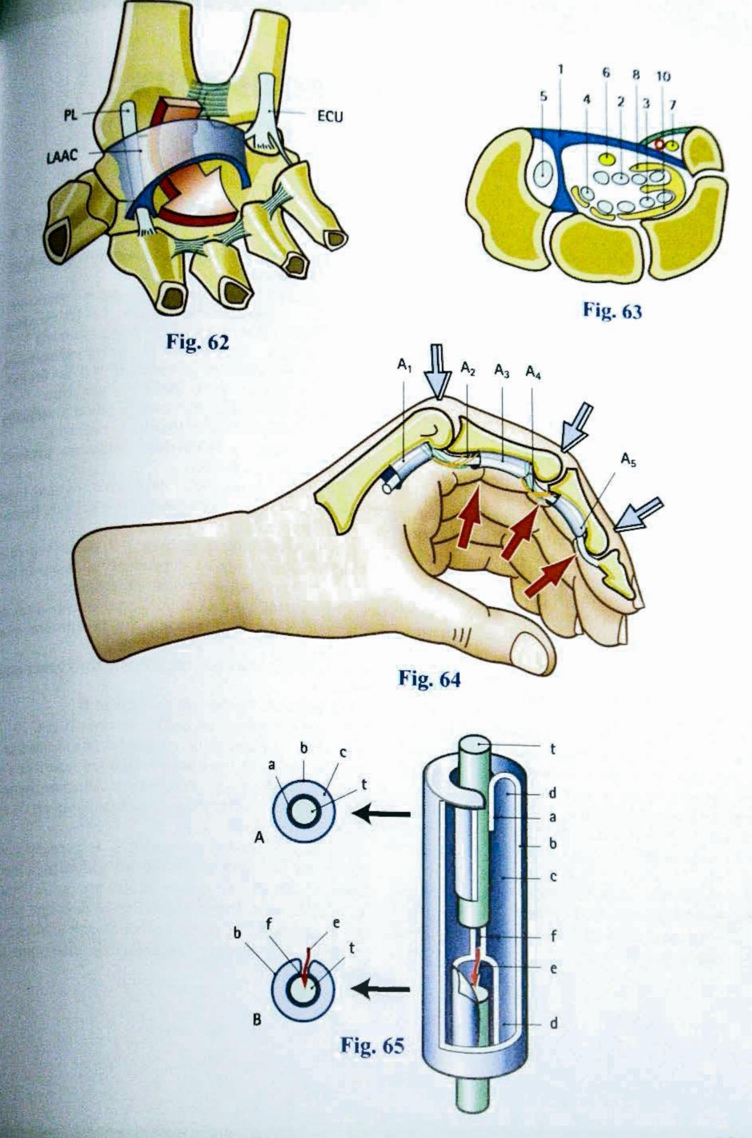


Fig. 62

Fig. 63

Fig. 64

Fig. 65

Les tendons des longs fléchisseurs des doigts

Les muscles fléchisseurs des doigts, très puissants, donc volumineux, sont situés dans la loge antérieure de l'avant-bras : ce sont des **muscles extrinsèques.** Ils agissent sur la main et les doigts par l'intermédiaire de longs tendons, dont la terminaison est très particulière (Fig. 66).

Le tendon le plus superficiel, celui du ***flexor communis superficialis*** (fléchisseur commun superficiel des doigts) (en bleu sur le schéma) se termine sur la deuxième phalange, donc proximalement par rapport à la terminaison du tendon profond, du ***flexor communis profondus*** (fléchisseur commun profond des doigts) (coloration rose). **Il faut donc obligatoirement que ces deux tendons se croisent dans l'espace et nécessairement d'une manière symétrique** sous peine d'introduire une composante latérale nuisible. La seule solution est que **l'un des tendons** passe **à travers l'autre.**

Mais lequel des deux doit-il perforer l'autre ? En toute logique, ce ne pouvait être que le profond qui perfore le superficiel, puisque son insertion est distale. On retiendra facilement que c'est le profond qui est perforant et le superficiel qui est perforé.

Les schémas classiques d'anatomie montrent à chaque niveau, **M** (métacarpien), **P1**, **P2** et **P3**, les **modalités de ce croisement** :

- Le tendon superficiel (bleu) se dédouble (Fig. 67) au niveau de l'articulation métacarpo-phalangienne en deux languettes, qui contournent les bords du tendon profond avant de se réunir au niveau de l'articulation inter-phalangienne proximale pour s'insérer sur les faces latérales de P2. Ceci est visible sur les coupes (Fig. 68) et la vue en perspective (Fig. 69).

Sur la vue « éclatée » (Fig. 70), on distingue en outre les mésotendons qui sont des lamelles synoviales porteuses de vaisseaux, assurant la nutrition des tendons selon Lundborg & coll.

On les appelle ***vincula tendinorum***, constituées en deux systèmes :

1) Le **système du fléchisseur commun superficiel** par deux apports :

- L'un **proximal**, pour la **zone A**, par les micro-vaisseaux longitudinaux intrinsèques **1** et les vaisseaux du cul-de-sac proximal de la gaine synoviale **2** ;
- L'autre **distal**, pour la **zone B**, par les **vaisseaux du *vinculum brevis*** **3** au niveau des insertions des bandelettes latérales sur la deuxième phalange.

Entre les deux zones, il existe **un segment avasculaire** 4 correspondant à la division des bandelettes.

2) Le **système du fléchisseur commun profond** comprend trois apports :

- Un **proximal,** pour la **zone A,** avec les deux types de vaisseaux **5** et **6** comparables à ceux du fléchisseur superficiel ;
- Un **intermédiaire**, pour la **zone B**, par les vaisseaux du *vinculum longus* **7** dépendant lui-même du *vinculum brevis* du fléchisseur superficiel ;
- Et un **distal**, pour la **zone C**, par les vaisseaux du *vinculum brevis* d'insertion sur la troisième phalange 8.

Pour le fléchisseur profond, il existe **trois zones avasculaires** :

- Un segment **9** entre les zones A et B ;
- Un autre segment **10** entre les zones B et C ;
- Et enfin, au niveau de ce que les chirurgiens de la main nomment le ***no man's land***, en regard de l'inter-phalangienne proximale, une zone périphérique **11** d'un millimètre d'épaisseur, soit le quart du diamètre du tendon.

La connaissance de ces systèmes de vascularisation tendineuse est **indispensable au chirurgien de la main** s'il veut éviter de compromettre ou de détruire les apports vasculaires nécessaires à la bonne trophicité des tendons. En outre, les zones avasculaires comportent un risque plus élevé de lâchage des sutures tendineuses.

M

P_1

P_2

P_3

Fig. 67

Fig. 68

Fig. 66

Fig. 69

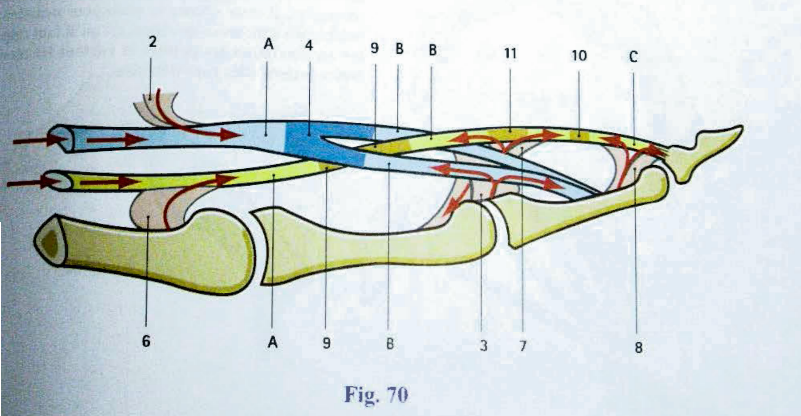


Fig. 70

On pourrait concevoir une disposition plus simple où les tendons n'auraient pas à se croiser : le tendon se terminant sur **P2** serait profond et le tendon s'insérant sur **P3** serait superficiel et l'on est ainsi amené à se demander : quelle est la nécessité mécanique de ce croisement apparemment compliqué ? Sans tomber dans le finalisme, il est permis de remarquer (Fig. 71) qu'en restant superficiel presque jusqu'à sa terminaison, le tendon fléchisseur de la deuxième phalange forme avec celle-ci un angle à traction ou « **angle d'attaque** », plus grand que s'il était au contact du squelette ; de ce fait (Fig. 74), **l'accroissement de l'angle d'attaque a du tendon FCS, augmente son efficacité** et l'on peut alors donner une explication logique au fait que c'est le tendon superficiel et non le profond qui est perforé.

L'action de ces deux muscles se déduit de leur point d'insertion :

- Le ***flexor superficialis*** (fléchisseur commun superficiel des doigts) **FCS** (Fig. 71) qui s'insère, nous l'avons vu, sur la deuxième phalange, est fléchisseur de la deuxième phalange sans action sur la troisième. Il est très peu fléchisseur de la première phalange, encore faut-il que la deuxième soit déjà complètement fléchie. Son efficacité est maximum lorsque la première phalange est **maintenue en extension par contraction de l'extenseur commun** (exemple d'antagonisme-synergie). Son angle d'attaque, donc son efficacité, s'accroît régulièrement à mesure que **P2** fléchit.
- Le ***flexor profondus*** (fléchisseur commun profond des doigts) **FCP** (Fig. 72) ; qui s'insère sur la base de la troisième phalange, est avant tout fléchisseur de la troisième phalange. Mais cette flexion de **P3** s'accompagne très rapidement de la flexion de **P2** car il n'existe pas d'extenseur électif de cette phalange capable de s'opposer à cette flexion. Pour explorer la force du fléchisseur profond, il faut donc maintenir manuellement **P2** en extension. Lorsque **P1** et **P2** sont portées manuellement en flexion à 90°, le fléchisseur profond est incapable de fléchir **P3** : il est inefficace car trop détendu. Son efficacité est maximum lorsque la première phalange est maintenue en extension par contraction de l'extenseur commun (exemple d'antagonisme-synergie). Malgré ces limitations, nous verrons le rôle important du FCP.

Les radiaux **Rx** et l'extenseur commun **EC** sont synergiques des fléchisseurs (Fig. 73).

Toutes ces actions tendineuses ne sont pas concevables sans les poulies **A1 – A3 – A5** (Fig. 75) qui **maintiennent les tendons au contact de l'arc squelettique** formé par le métacarpien et les phalanges.

Il est facile de comprendre le **rôle des poulies** (Fig. 76) : par rapport à sa position normale **a**, le tendon du FCP, se trouve artificiellement allongé **b** si l'on exclut la poulie **A1**. Il en est de même **c** pour la destruction de la poulie **A3**, ainsi que pour celle d de la poulie **A5**.

Prenant la corde de l'arc squelettique **d**, le tendon perd toute efficacité du fait de son allongement relatif. Heureusement, il reste encore la peau pour maintenir le tendon ! La conclusion pratique, est qu'**il faut respecter au maximum les poulies et surtout les reconstruire lorsqu'elles sont détruites.**

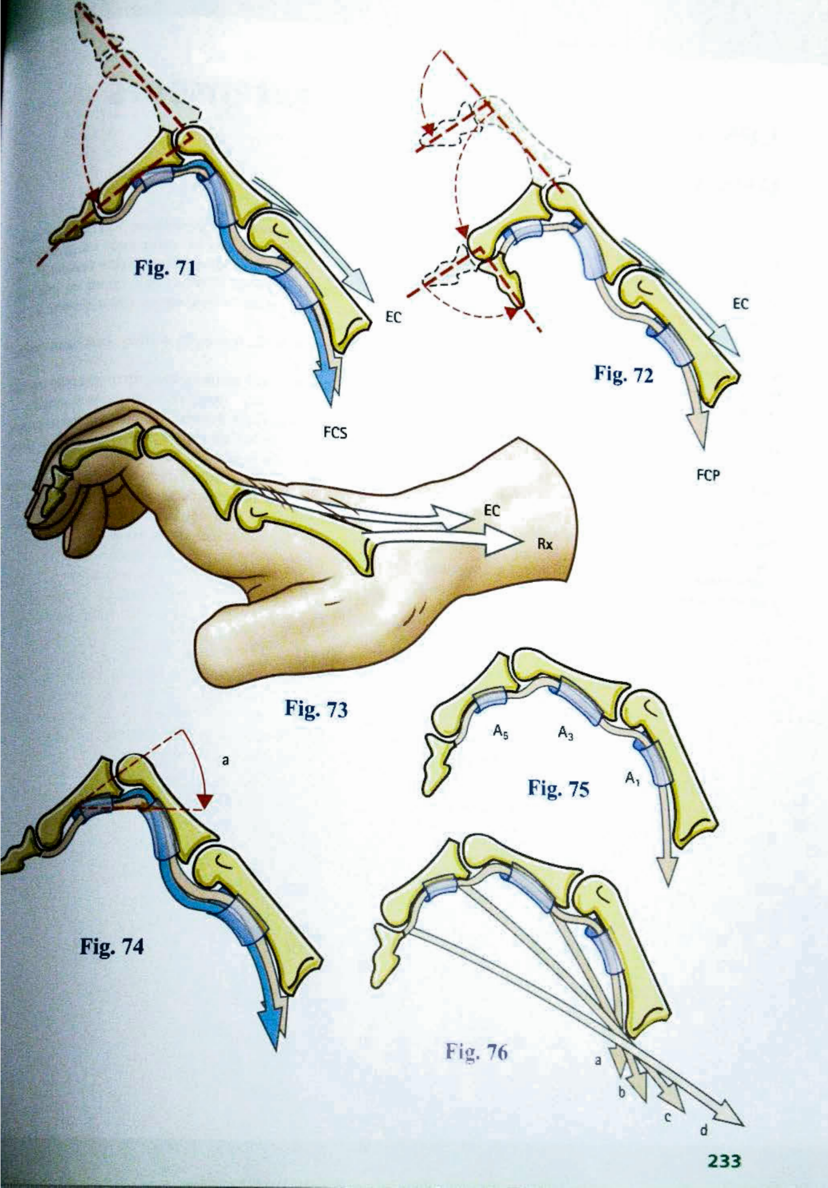


Fig. 71

Fig. 72

Fig. 73

Fig. 74

Fig. 75

Fig. 76

Les tendons des muscles extenseurs des doigts

Les muscles extenseurs des doigts sont aussi, pour la plupart, des **muscles extrinsèques.** Ils parcourent aussi des coulisses, mais comme leur trajet est dans l'ensemble convexe, celles-ci sont moins nombreuses. Il n'en existe qu'au poignet**, seul point où le trajet des tendons devient concave lors de l'extension**. La coulisse ostéo-fibreuse est ici formée par l'extrémité inférieure des deux os de l'avant-bras et par le ***retinaculum extensorum*** (ligament annulaire postérieur du carpe) (Fig. 77). Cette coulisse est elle-même **subdivisée en six tunnels** par des cloisons fibreuses tendues de la face profonde du ligament annulaire au squelette. On trouve, de dedans en dehors (de gauche à droite sur le schéma), les tunnels pour les tendons suivants :

1) ***Extensor carpi ulnaris*** 1 (cubital postérieur) ;
2) ***Extensor digiti minimi*** 2 (extenseur propre du cinquième) dont le tendon va rejoindre plus bas celui de l'extenseur commun destiné, lui aussi, au cinquième doigt ;
3) ***Extensor communis digitorum*** 3 (extenseur commun) quatre tendons accompagnés en profondeur par le tendon de l'***extensor proprius indicis*** 3' (extenseur propre de l'index) qui rejoint un peu plus bas le tendon de l'extenseur commun destiné à l'index ;
4) ***Extensor pollicis longus*** 4 (long extenseur propre du pouce) ;
5) ***Extensor carpi radialis longus*** 5 (premier radial) et ***extensor carpi radialis*** 5' (deuxième radial) ;
6) ***Extensor pollicis brevis*** 6 (court extenseur propre du pouce) et de l'***abductor pollicis longus*** 6' (long abducteur du pouce).

Dans ces coulisses ostéo-fibreuses, ces tendons sont enveloppés par des **gaines séreuses** (Fig. 78) qui débordent en haut le ligament annulaire dorsal et s'étendent assez bas sur le dos de la main.

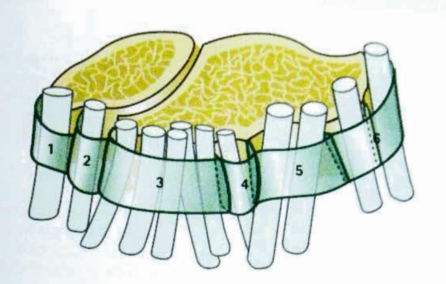


Fig. 77

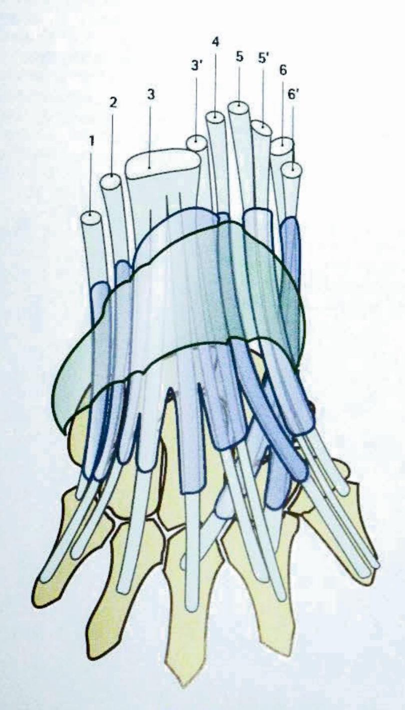


Fig. 78

Entre les tendons extenseurs, au dos de la main, il existe des ***junctura tendinorum*** (bandelettes inter-tendineuses), le plus souvent tendues obliquement et distalement de l'extenseur de l'annulaire aux extenseurs du majeur et de l'auriculaire, mais les variations sont très nombreuses en topographie, en direction (oblique ou transversale) si bien que parfois, au lieu de jouer un **rôle de suppléance et de facilitation**, elles peuvent être une gêne à l'indépendance des doigts, grave inconvénient pour un pianiste : Robert Schumann compositeur célèbre se serait sectionné lui-même une bandelette gênante…

Du point de vue physiologique, **l'extenseur commun des doigts** est essentiellement **l'extenseur de la première phalange** sur le métacarpien.

Cette action apparaît nettement et avec force, quelle que soit la position du poignet. Elle est cependant facilitée par la flexion du poignet (Fig. 79). Elle est transmise à la première phalange (Fig. 80 et 81 : chaîne osseuse d'un doigt) par l'expansion profonde **1**, longue de 10 à 12 mm, qui se détache de la face profonde du tendon, nettement distincte de la capsule de la métacarpo-phalangienne, pour se fixer avec cette capsule sur la base de P1 : sur la vue dorsale (Fig. 80), un segment de tendon réséqué laisse voir cette expansion profonde **1**).

Par contre, **l'action sur la deuxième phalange** - par l'intermédiaire de la languette médiane 2 - et **sur la troisième phalange** - par l'intermédiaire des deux languettes latérales 3 - dépend du degré de tension du tendon et, par conséquent, **de la position du poignet** (Fig. 79), et aussi **du degré de flexion de l'articulation métacarpo-phalangienne** :

- Elle n'est notable que lorsque le poignet est fléchi **A** ;
- Elle est partielle et incomplète lorsqu'il est en rectitude **B** ;
- Elle est nulle lorsque le poignet se trouve en extension **C**.

L'action de l'extenseur commun sur les deux dernières phalanges dépend en effet du degré de tension des fléchisseurs : si les fléchisseurs sont tendus du fait de l'extension du poignet ou de la métacarpo-phalangienne, l'extenseur commun est incapable à lui seul d'étendre les deux dernières phalanges ; si au contraire, les fléchisseurs sont détendus par flexion du poignet ou de la métacarpo-phalangienne (ou par leur section accidentelle), l'extenseur commun peut étendre facilement les deux dernières phalanges.

Le tendon de l'**extenseur propre de l'index et celui de l'auriculaire** possèdent la même physiologie que le tendon correspondant de l'extenseur commun avec lequel ils se confondent. Ils permettent l'extension isolée de l'index et de l'auriculaire (geste de « faire les cornes », celui du « *jettatore* » des Napolitains).

Accessoirement, **au niveau de l'index**, les tendons extenseurs ont, selon Duchenne de Boulogne, une action de latéralité (Fig. 82) : l'extenseur propre **A** entraîne l'adduction, l'extenseur commun **B** l'abduction. Cette action apparaîtrait lorsque les interosseux correspondants ont été mis hors jeu par la flexion des deux dernières phalanges et l'extension de la première.

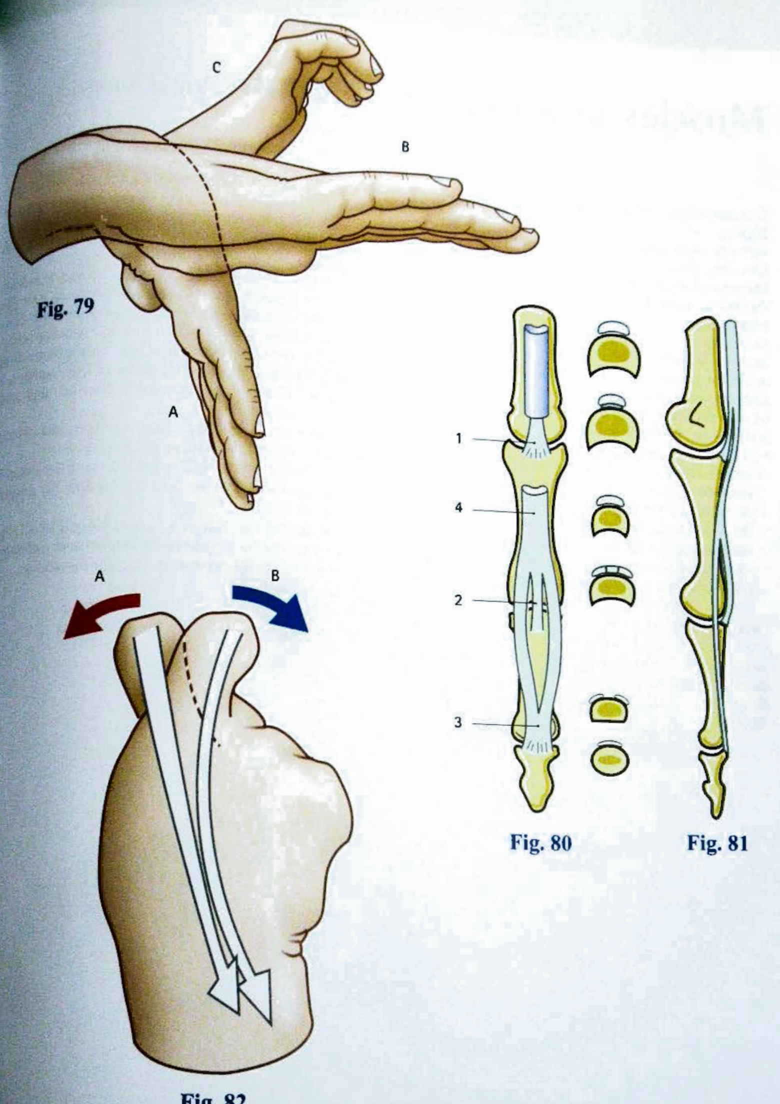


Fig. 79

Fig. 80

Fig. 81

Fig. 82

Muscles interosseux et lombricaux

Les **insertions des interosseux** sont résumées par les Figures 83, 84 et 85. Ces insertions ne nous intéressent que pour éclairer les actions musculaires.

Les interosseux ont **deux types d'actions sur la métacarpo-phalangienne** : **action de latéralité** et **la flexion-extension**.

Leur **action de latéralité** est due à l'insertion d'une partie du tendon terminal sur le tubercule latéral de la base de la première phalange **1** ; il existe parfois un corps musculaire distinct, surtout au niveau du premier interosseux dorsal (Winslow).

Le sens du mouvement de latéralité est commandé par la direction du corps musculaire :

- Lorsqu'il se porte vers l'axe de la main (troisième doigt) - c'est le cas des ***interossei dorsales,*** les dorsaux en vert (Fig. 83) - il commande l'écartement des doigts (flèches vertes). Il est évident que si les deuxième et troisième interosseux se contractent simultanément, leur action de latéralité sur le médius s'annule. Au niveau de l'**auriculaire,** l'écartement est réalisé par l'***abductor quinti minimi*** **5** (adducteur du cinquième) (Fig. 84), équivalent d'un interosseux dorsal. Au niveau du **pouce**, le faible écartement réalisé sur **P1** par l'***abductor pollicis brevis*** **6** (court abducteur du pouce) est compensé par celui de l'***abductor pollicis longus*** (long abducteur) qui agit sur le premier métacarpien ;
- Lorsque le tendon se rapproche de l'axe de la main - c'est le cas des ***interossei palmares*** en rose (interosseux palmaires) (Fig. 84) - le muscle commande le rapprochement des doigts (flèches roses).

Les **interosseux dorsaux** sont **plus volumineux donc plus puissants** que les palmaires ce qui explique la moindre efficacité des palmaires dans le rapprochement des doigts.

Les insertions des interosseux sur les métacarpiens sont bien détaillées sur une coupe (Fig. 85) :

- Sur deux métacarpiens adjacents pour les ***interosseux dorsaux*** (verts) dont les tendons se dirigent vers le médius ;
- Sur un seul métacarpien, le plus éloigné du IIIe (qui n'en comporte pas) pour les ***interosseux palmaires*** (roses) dont les tendons s'écartent du médius.

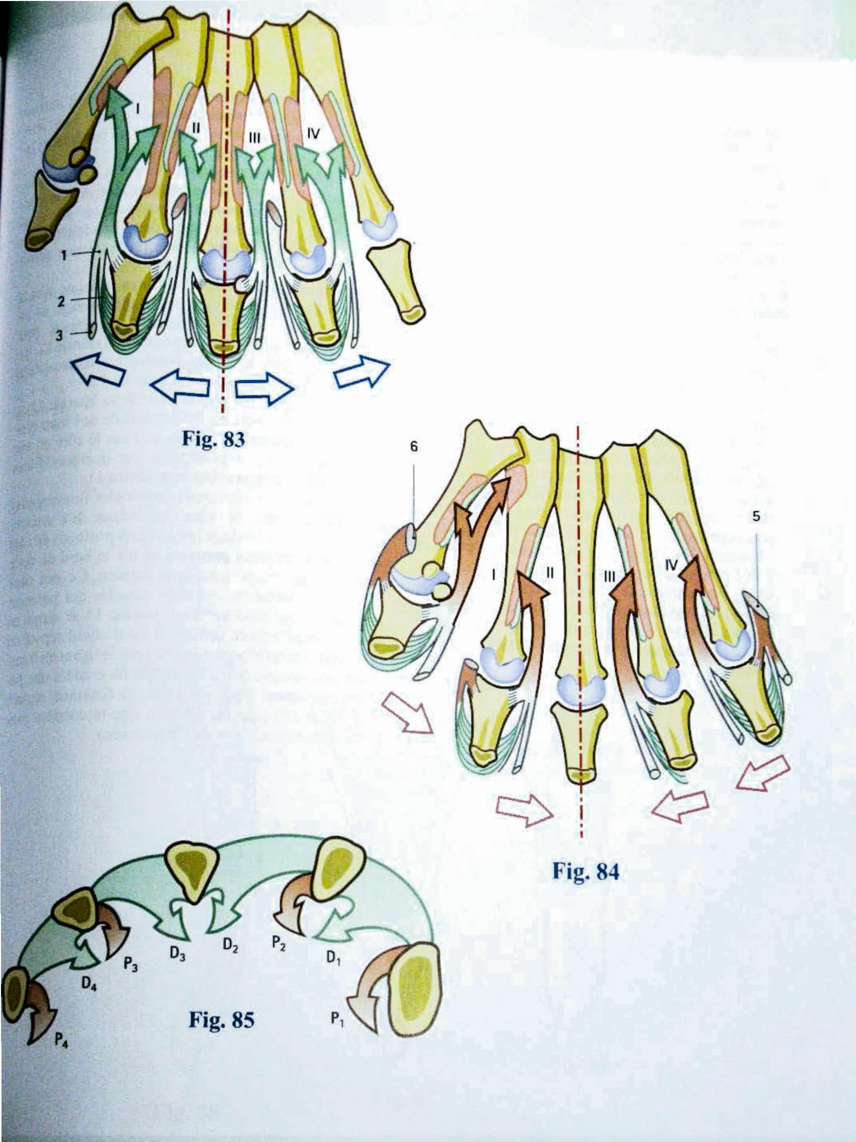


Fig. 83

Fig. 84

Fig. 85

Les tendons des interosseux, engainés par **des formations fibro-aponévrotiques annexées au ligament transverse inter-métacarpien**, ne peuvent se luxer en avant lors de la flexion des métacarpo-phalangiennes, car ils sont maintenus par le ligament transverse situé en avant d'eux. Ce n'est pas le cas pour le premier interosseux dorsal auquel manque cet appui : quand la bandelette fibreuse qui le maintient est distendue par le processus rhumatismal, son tendon glisse en avant et **il perd son action d'abduction pour devenir fléchisseur**.

Leur action sur la flexion-extension ne peut être comprise sans avoir décrit auparavant la **structure de l'aponévrose dorsale du doigt** (Fig. 86, 87 et 88) :

- L'interosseux constitue une **lame fibreuse** qui, passant sur la face dorsale de **P1**, va se continuer dans son homologue contro-latérale : c'est la **dossière des interosseux** 2. Vue par sa face profonde (Fig. 87), les phalanges supposées enlevées, l'aponévrose dorsale fait apparaître cette dossière après avoir émis son insertion 1 pour le tubercule latéral de **P1**, ce tendon est formé d'une partie relativement épaisse 2 et d'une partie plus mince 2', fibres obliques allant se jeter sur les **languettes latérales** 7 de l'extenseur commun. La partie épaisse 2 glisse sur la face dorsale de **P1** et de l'articulation métacarpo-phalangienne par l'intermédiaire d'une petite **bourse séreuse** 9, juste au-dessous de laquelle se détache la **languette profonde** 4 de l'extenseur commun ;
- Une **troisième expansion** du tendon de l'interosseux forme une **mince bandelette** 3 qui va se jeter en deux contingents de fibres sur les bandelettes latérales de l'extenseur :
  - quelques fibres obliques 10 vers la languette médiane forment la **lame triangulaire**, dont la fonction est extrêmement importante, car elle « ramène » dorsalement des bandelettes de l'extenseur lorsque l'inter-phalangienne proximale se met en extension ;
  - la plus grande partie des fibres fusionne avec la languette latérale peu avant son passage au niveau de l'inter-phalangienne proximale, pour former une deuxième **bandelette latérale** 12, qui va s'insérer avec son homologue contro-latéral sur la face dorsale de la base de **P3**.

Remarquez (Fig. 88) que la bandelette latérale 12 ne passe pas exactement sur la face dorsale de l'inter-phalangienne proximale, mais un peu sur le côté où elle se trouve retenue à la capsule par quelques fibres transversales, **l'expansion capsulaire** 11.

Quant aux quatre muscles ***lombricales*** (lombricaux) (Fig. 89), comptés de dehors en dedans, ils s'insèrent sur les bords des tendons fléchisseurs profonds du côté radial pour les deux premiers et sur le bord de deux tendons adjacents pour les deux derniers. Ce sont, dans l'anatomie humaine, les seuls muscles qui prennent origine sur des tendons. Leur tendon 13 se dirige en bas et revient vers le dedans. Il est d'abord séparé du tendon de l'interosseux (Fig. 88) par le ligament transverse inter-métacarpien 14, ce qui lui confère une position nettement plus palmaire. Il fusionne ensuite (Fig. 87 et 88) plus distalement que la dossière avec la troisième expansion de l'interosseux.

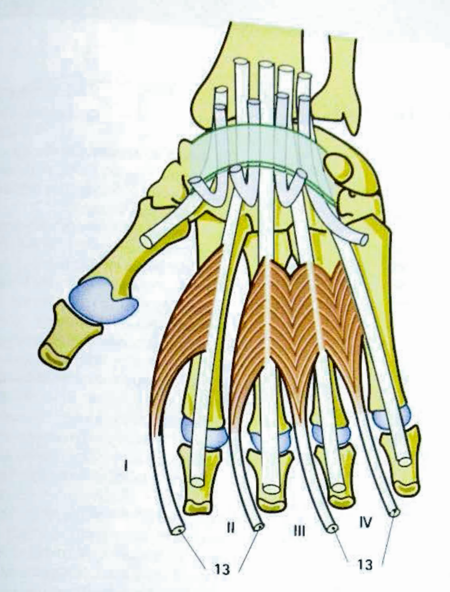


Fig. 89

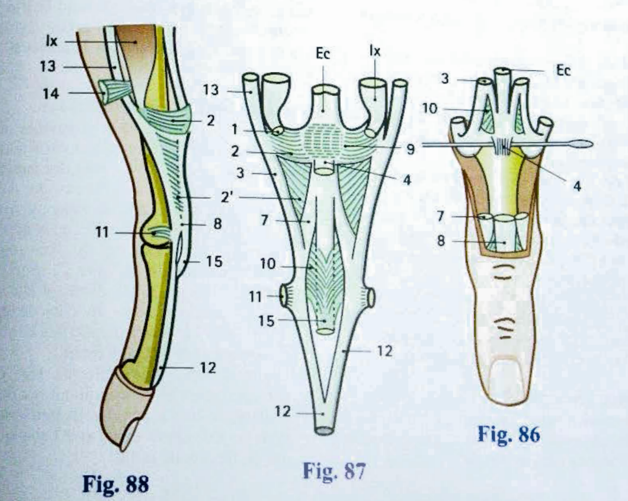


Fig. 88

Fig. 87

Fig. 86

L'extension des doigts

L'extension des doigts est due à l'action combinée de l'*extensor digitorum communis* (EC), des interossei (Ix), des *lombricalis* (Lx), et même, dans une certaine mesure, du *flexor digitorum superficialis* (FCS), tous ces muscles intervenant dans des rapports de synergie-antagonisme variables suivant la position de la métacarpo-phalangienne (MP) et du poignet. Il s'y ajoute l'action purement passive du **ligament rétinaculaire**, qui coordonne l'extension des deux dernières phalanges.

L'extenseur commun (*extensor digitorum communis*)

Nous avons vu (p. 222) que l'EC n'est l'extenseur véritable que de la première phalange **P1** et n'agit sur **P2** et **P3** que si les fléchisseurs sont détendus par flexion du poignet, flexion de la MP, ou section des fléchisseurs.

Sur une préparation anatomique, la traction sur l'EC détermine une extension complète de **P1** et incomplète de **P2** et **P3**. Le degré de tension des différentes insertions de l'EC dépend étroitement du degré de flexion des phalanges :

- La flexion passive isolée de **P3**, (Fig. 90) détend de 3 mm la bandelette médiane et l'expansion profonde ; donc l'EC n'agit plus directement sur **P1** et **P2** ;
- La flexion passive de **P2** (Fig. 91) a deux conséquences :
- Elle détend de 3 mm les bandelettes latérales a grâce au dérapage b des bandelettes qui glissent en position palmaire, attirées par l'expansion capsulaire **11** (Fig. 88). Lors de l'extension de **P2** elles reviennent en position dorsale grâce à l'élasticité de la lame triangulaire **10** (Fig. 87) ;
- Elle détend de 7-8 mm l'expansion profonde **c**, ce qui prive l'**EC** de son action directe sur **P1**. L'**EC** peut cependant étendre indirectement P1 par l'intermédiaire de **P2** si cette dernière est stabilisée en flexion par le **FCS** qui joue ainsi un rôle adjuvant de l'**EC** dans l'extension de la **MP** (Fig. 92) : **e''** et **f'** s'annulent, **e'** et **f'** s'additionnent et se décomposent sur **P1** en **A** composante axiale et **B** composante d'extension, ce qui inclut ainsi une partie de l'action du FCS (R. Tubiana et P. Valentin).

Les interosseux (*interossei*)

Ils sont fléchisseurs de **P1** et extenseurs de **P2** et **P3**, mais leur action sur les phalanges dépend du degré de flexion de la MP et de l'état de tension de l'EC :

- Si la **MP se trouve portée en extension** (Fig. 93) par contraction de l'**EC**, la dossière est entraînée à au-dessus de la MP vers le dos du premier métacarpien (Sterling Bunnel) ;
- Les expansions latérales peuvent ainsi se tendre b et entraîner l'extension de **P2** et **P3** ;
- Si la **MP passe en flexion** (Fig. 94) par relâchement de l'EC, **a** et contraction du lombrical (non figuré), la dossière glisse sur le dos de **P1 b** ; sa course est de 7 mm (Sterling Bunnel) ; la contraction des **Ix** et agissant sur la dossière fléchit puissamment la MP ; mais, de ce fait, les expansions latérales, retenues par la dossière, sont détendues **d** et perdent leur action d'extension sur **P2** et **P3** d'autant plus que la MP est plus fléchie - c'est à ce moment-là par contre que l'**EC** devient efficace sur **P2** et **P3**.
- Il existe donc, comme l'a montré Sterling Bunnel **un balancement synergique** dans l'action d'extension de l'**EC** et des **Ix** sur **P2** et **P3** :
- Sur une **MP fléchie à 90°**, l'action de l'**EC** est maximum sur **P2** et **P3** ; l'action des **Lx** est, elle aussi, maximum : ils retendent les bandelettes latérales (Fig. 96), les **Ix** étant inefficaces ;
- Sur une **MP en position intermédiaire**, l'action de l'**EC** est complémentaire de celle des **Ix** ;
- Sur une **MP étendue** : l'action de l'**EC** est nulle sur **P2** et **P3** ; par contre, l'action des **Ix** est maximum car ils retendent les bandelettes latérales b (Fig. 93 et 95).

Les lombricaux (*lumbricalis*)

Ils sont **fléchisseurs de P1** et **extenseurs de P2 et P3**. À l'inverse des **Ix**, ils déterminent ces actions quelle que soit la flexion de la MP. Ce sont des muscles extrêmement précieux pour les mouvements des doigts. Ils doivent cette efficacité à deux dispositions anatomiques :

- Leur situation plus palmaire, en avant du ligament transverse inter-métacarpien, leur confère un **angle d'approche de 35°** avec **P1** (Fig. 95) : ils peuvent ainsi fléchir la MP même si elle se trouve en hyperextension. Ce sont donc les démarreurs de la flexion de **P1** (*Flexor-staters*), les Ix n'agissant que secondairement sur la dossière ;
- Leur insertion distale s'effectue (Fig. 96) sur les expansions latérales en aval du niveau de la dossière. N'étant pas bridés par elle, **ils peuvent retendre le système extenseur de P2 et P3** quel que soit le degré de flexion de la MP.

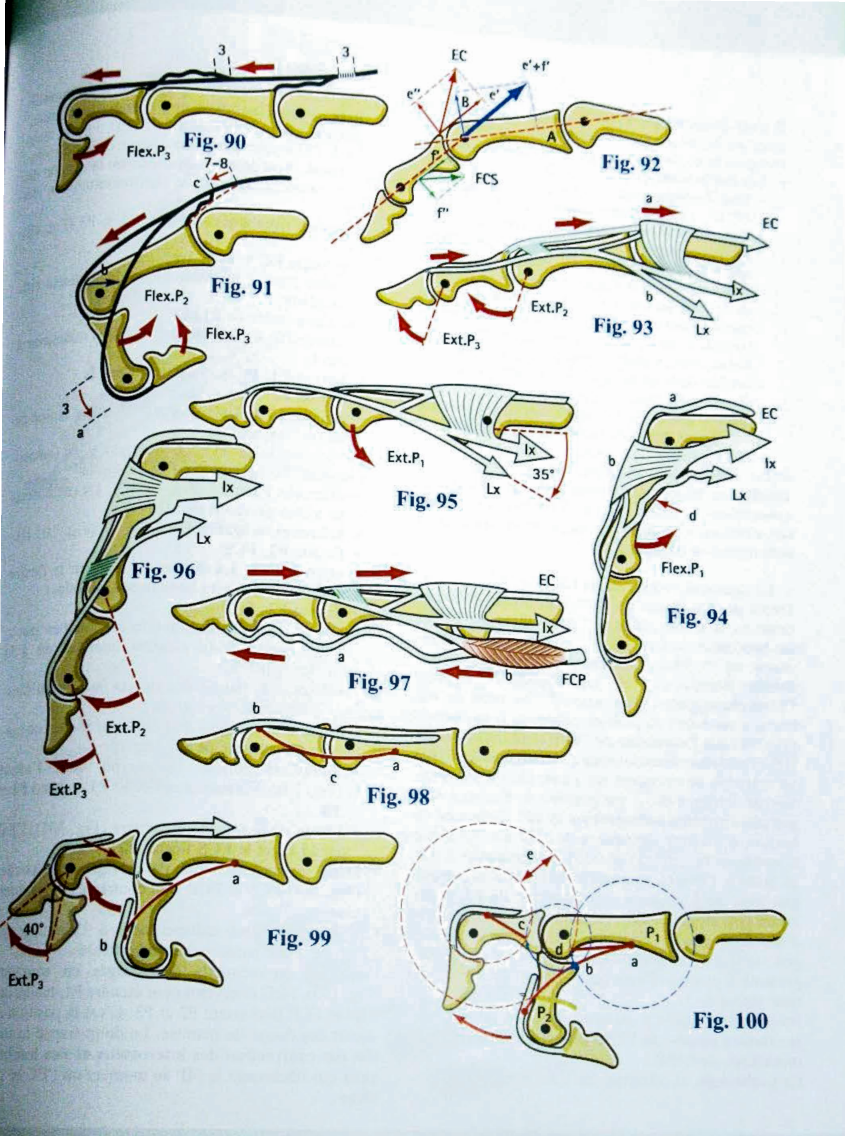


Fig. 90
Flex.P_3
3
Fig. 91
7–8
c
b
Flex.P_2
Flex.P_3
a
Fig. 92
EC
e'+f'
e''
e'
B
A
f'
FCS
f''
Fig. 93
a
EC
Ix
b
Lx
Ext.P_2
Ext.P_3
Fig. 95
Ext.P_1
Ix
Lx
35°
Fig. 94
a
EC
b
Ix
Lx
d
Flex.P_1
Fig. 96
Ix
Lx
Ext.P_2
Ext.P_3
Fig. 97
EC
Ix
a
b
FCP
Fig. 98
b
a
c
Fig. 99
a
b
40°
Ext.P_3
Fig. 100
e
c
d
b
a
P_1
P_2

Il a été démontré par Eyler et Marque, et par Landsmeer que les interosseux possèdent parfois deux chefs, l'un pour la dossière, l'autre pour l'expansion latérale :

- **Les lombricaux** (*lumbricalis*) (Fig. 97) :
  - Pour Recklinghausen, ils facilitent l'extension de **P2** et **P3** en détendant la portion distale des tendons du FCP **a** sur lesquels ils prennent leur insertion proximale **b**. Grâce à ce **système diagonal actif**, la contraction des lombricaux déplace fonctionnellement l'insertion terminale du **FCP** de la face palmaire à la face dorsale de **P3**, le transformant en un extenseur, équivalent d'un interosseux ; ce système est semblable, en électronique, à un transistor qui aiguille le passage d'un courant dans un sens ou dans l'autre suivant son état d'excitation. Cet *effet transistor* aboutit, grâce à une faible puissance, celle du lombrical – à dériver une forte puissance – celle du FCP - vers le système extenseur.

Enfin, contenant de nombreux **récepteurs proprioceptifs**, les lombricaux recueillent des informations essentielles (P. Rabischong) pour coordonner le tonus des extenseurs et des fléchisseurs entre lesquels ils sont tendus en diagonale ;

- **Le ligament rétinaculaire LR** (Fig. 98)

Décrit par Landsmeer en 1949, il est formé de fibres, émanées de la face palmaire **a** de **P1** et se jetant **b** sur les bandelettes latérales de l'**EC** et, par leur intermédiaire, sur **P3**. Mais, fait essentiel, à l'inverse des bandelettes latérales de l'**EC**, les fibres du **LR** croisent l'inter-phalangienne proximale **IPP** en avant de son axe **c**, c'est-à-dire en position palmaire. Il en découle (Fig. 99) que l'**extension de l'IPP tend les fibres du LR** et entraîne mécaniquement **l'extension de l'IPD** de la moitié de sa course, qui passe ainsi d'une position de flexion à 80° à une position de flexion à 40°, soit une **extension automatique de 40°**. Cette mise en tension du LR par l'extension de l'IPP est très facile à mettre en évidence (Fig. 100) : si l'on coupe le LR au point b, **l'extension passive de P2 ne s'accompagne plus de l'extension automatique de P3** tandis qu'on voit les extrémités sectionnées du LR s'écarter d'une distance **cd** (**d** étant la position finale de **b**, point pris sur le LR et tournant autour de a tandis que c représente la position finale de **b**, point pris sur **P2** tournant autour de **O**.

Inversement, si le LR est resté intact, il est possible par **flexion passive de l'IPD d'obtenir la flexion automatique de l'IPP**.

En **pathologie**, la rétraction du LR :

- Fixe la déformation du doigt dite « **en boutonnière** », due à la rupture de l'aponévrose dorsale ;
- Entraîne **l'hyperextension de l'IPD** dans la maladie de Dupuytren parvenue à son troisième stade.

En résumé, il est possible de connaître le résultat des actions musculaires sur la flexion/extension des doigts :

- Extension simultanée de P1 + P2 + P3 (Fig. 101 A) :
  - synergie **EC + Ix + Lx** ;
  - action passive et automatique du ligament rétinaculaire.
- Extension isolée de P1 : EC :
  - + flexion **P2** : **FCS** (adjuvant de l'EC) relâchement des Ix
  - + flexion **P3** : **FCP** relâchement des Ix.
  - + flexion **P2** : **FCS** (Id)
  - + extension **P3** : **Lx + Ix** (cette dernière action est très difficile).
- Flexion isolée de P1 : **Lx** (starters) + **Ix** (antagonisme EC/Ix : relâchement EC) :
  - + extension **P2** et **P3** (Fig. 101 C) : Lx (extenseurs en toutes positions de MP)
  - + balancement synergique EC + Ix (Fig. 101 B).
  - + flexion **P2** : FCS
  - + extension **P3** : **Lx** (action difficile car la flexion de l'IPP relâche les bandelettes latérales).
  - + flexion **P2** : FCS
  - + flexion P3 : **FCP** (son action est facilitée par le « dérapage des bandelettes latérales dû à la flexion d'IPP »).

Les **mouvements usuels des doigts** ne font qu'illustrer ces différentes éventualités :

- Dans les **mouvements de l'écriture** étudiés en premier par Duchenne de Boulogne :
  - + lorsqu'on pousse le crayon vers l'avant (Fig. 102), l'interosseux fléchit **P1** et étend **P2** et **P3** ;
  - + lorsqu'on le ramène en arrière (Fig. 103), l'**EC** étend **P1** et le **FCS** fléchit **P2** ;
- Dans les mouvements des **doigts en crochet** (Fig. 104) **FCS** et **FCP** sont contractés et les interosseux relâchés.

Ce mouvement est indispensable à l'alpiniste qui s'agrippe à une paroi rocheuse verticale.

Dans les mouvements des **doigts en marteau** (Fig. 105), l'EC intervient pour étendre P1, tandis que FCS et FCP fléchissent P2 et P3. C'est la position de départ des doigts du pianiste. Le doigt frappe la touche par **contraction des interosseux** et **des lombricaux** qui fléchissent la MP au moment où l'EC se relâche.

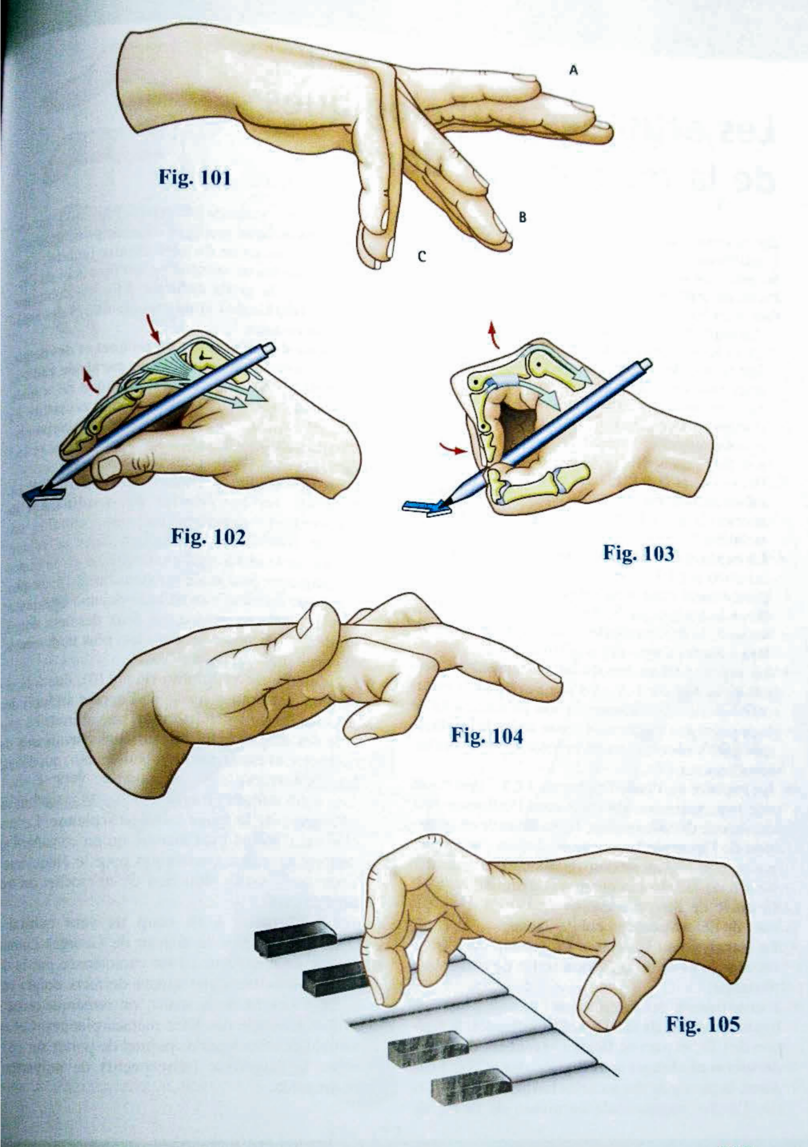


Fig. 101

Fig. 102

Fig. 103

Fig. 104

Fig. 105

Les attitudes pathologiques de la main et des doigts

De multiples attitudes vicieuses peuvent découler de l'insuffisance ou de l'exagération de l'action d'un des muscles que nous venons d'étudier.
Parmi les **attitudes vicieuses des doigts** (Fig. 106), il faut connaître :

- **La rupture de l'aponévrose dorsale a**, au niveau de la lame triangulaire, qui s'étend entre les deux bandelettes latérales et dont l'élasticité est nécessaire pour ramener ces bandelettes en position dorsale lorsque l'IPP revient en extension. Ici la face dorsale de l'articulation fait hernie dans la brèche aponévrotique, et les bandelettes restent luxées sur ses faces latérales, ainsi maintenues en demi-flexion alors que l'IPD est en hyperextension. La même attitude est provoquée par section de l'extenseur au niveau de l'IPP ; c'est l'attitude dite **en boutonnière** ;
- **La rupture du tendon extenseur b** juste avant son insertion sur P3, cause la flexion de P3, réductible passivement mais non activement. La flexion est due à la tonicité du FCP non compensée par l'extenseur; la déformation est dite du **doigt en maillet** ou ***mallet-finger*** des anglophones ;
- **La rupture du tendon du long extenseur au-dessus de la MP c** est cause d'une flexion de la métacarpo-phalangienne sous l'action prédominante de la dossière des interosseux ; cette **attitude intrinsèque plus** s'observe lors de la prédominance des interosseux sur l'EC ;
- **La rupture ou l'insuffisance du FCS d** détermine une hyperextension de l'IPP sous l'influence prédominante des interosseux. Cette **attitude en inversion** de l'inter-phalangienne proximale s'accompagne d'une légère flexion de l'inter-phalangienne distale du fait du raccourcissement relatif du FCP (à cause de l'hyperextension de l'IPP), d'où son nom de déformation en **col de cygne** ;
- **La paralysie ou la section du tendon du FCP e** entraîne la perte de la flexion active de la dernière phalange ;
- **L'insuffisance des interosseux f** se traduit par une **hyperextension de la MP**, sous l'influence de l'action de l'EC et par une **flexion accentuée des deux dernières phalanges** sous l'action des FCS et FCP. Ainsi, la paralysie des muscles intrinsèques brise-t-elle l'arche longitudinale au niveau de sa clé de voûte. Cette **attitude en griffe** (Fig. 108), ou encore **intrinsèque moins**, s'observe principalement lors de la **paralysie du nerf ulnaire** (cubital) - qui commande les interosseux - c'est pourquoi on l'appelle aussi la **griffe cubitale**. Elle s'accompagne d'une **atrophie de l'éminence thénar et des espaces interosseux**.
- **La perte des extenseurs du poignet et des doigts**, le plus souvent au cours d'une **paralysie radiale**, détermine une attitude caractéristique de « **main tombante** » (Fig. 107) avec flexion accentuée du poignet et flexion des articulations métacarpo-phalangiennes, les deux dernières phalanges restant étendues sous l'action des interosseux ;
- Dans la **maladie de Dupuytren** (Fig. 109), la **rétraction des bandelettes pré-tendineuses de l'aponévrose palmaire moyenne** entraîne une flexion irréductible des doigts dans la paume : flexion de la métacarpo-phalangienne et de l'inter-phalangienne proximale et extension de l'inter-phalangienne distale. Cette attitude vicieuse est souvent plus marquée au niveau des deux derniers doigts, l'index et le médius sont atteints plus tardivement, le pouce plus rarement ;
- La **maladie de Volkmann** (Fig. 110), due à la rétraction ischémique (perte de l'apport artériel) des muscles fléchisseurs détermine une attitude en crochet des doigts, nette surtout dans l'extension du poignet **a**, et estompée dans la flexion **b**, qui détend les fléchisseurs ;
- Une autre attitude en crochet (Fig. 111) est due au **phlegmon de la gaine cubito-carpienne**. Le crochet est d'autant plus marqué qu'on considère un doigt plus interne (maximum pour le cinquième). Toute tentative de réduction de ce crochet est très douloureuse ;
- Enfin, l'attitude « **en coup de vent cubital** » (Fig. 112 : d'après le tableau de Georges Latour : « Rixe de mendiants ») est caractérisée par la déviation simultanée des quatre derniers doigts vers le bord interne de la main ; on remarque aussi la saillie anormale des têtes métacarpiennes. Cet ensemble de déformations permet de porter sur ce tableau le diagnostic (rétrospectif) de polyarthrite rhumatoïde.

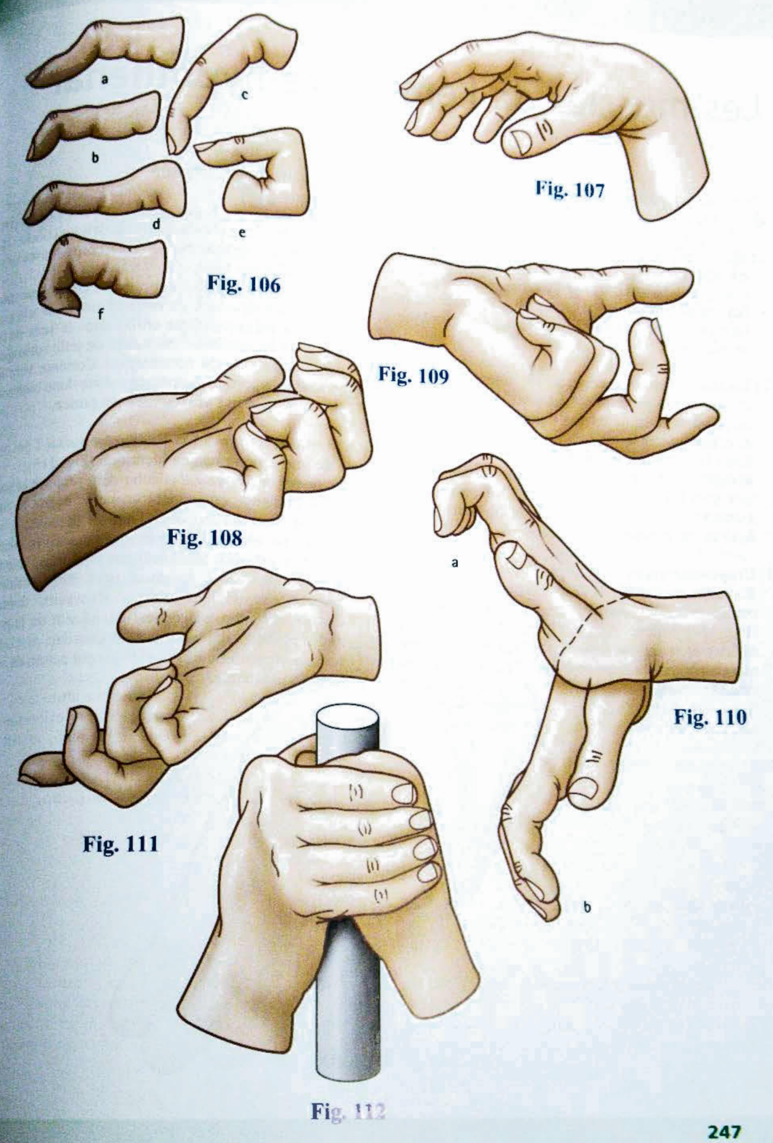


Fig. 106

Fig. 107

Fig. 108

Fig. 109

Fig. 110

Fig. 111

Fig. 112

Les muscles de l'éminence hypothénar

L'éminence hypothénar est occupée par **trois muscles** (Fig. 113) :

1) Le ***flexor brevis quinti*** (court fléchisseur du cinquième doigt) **1** ; inséré en bas sur le tubercule interne de la base de **P1**, sa direction est oblique en haut et en dehors vers son insertion charnue sur la face antérieure du ligament annulaire et l'apophyse unciforme ;

2) L'***adductor quinti*** (adducteur du cinquième doigt) **2** ; adducteur par rapport au plan de symétrie du corps, il se termine en bas comme un interosseux directement sur le tubercule latéral de **P1** (avec le court fléchisseur), par une dossière commune avec le quatrième interosseux palmaire et par une expansion vers la bandelette latérale de l'E.C. En haut, il s'attache sur la face antérieure du ligament annulaire et sur le pisiforme ;

3) L'***opponens quinti*** (opposant du cinquième doigt) **3** ; inséré en bas sur la face interne du cinquième métacarpien, il contourne son bord antérieur (Fig. 114) pour se diriger (flèche blanche et rose) en haut et en dehors vers le bord inférieur du ligament annulaire et l'apophyse unciforme, où il s'insère.

Sur le plan physiologique

L'***opponens quinti*** (Fig. 114) fléchit le cinquième métacarpien sur le carpe, autour de l'axe **XX'**, ce faisant il le porte en avant (flèche **1**) et en dehors (flèche 2). Cette direction oblique est celle du corps musculaire (flèche blanche et rose).

Mais, en même temps, il imprime au cinquième métacarpien un mouvement de rotation autour de son axe longitudinal (marqué d'une croix) dans le sens de la flèche **3**, en supination, c'est-à-dire de telle sorte que la partie antérieure du métacarpien s'oriente vers le dehors, vers le pouce. L'opposant mérite donc bien son nom, car **il oppose l'auriculaire au pouce**.

Le ***flexor brevis quinti*** **1** et l'***adductor quinti*** **2** ont ensemble une action presque identique (Fig. 115) :

- Le ***flexor brevis quinti*** (flèche verte) fléchit la première phalange sur le métacarpien et écarte le cinquième doigt par rapport à l'axe de la main ;
- L'***adductor quinti*** (flèche rouge) possède la même action : il est donc abducteur par rapport à l'axe de la main (troisième doigt) et peut être considéré comme l'équivalent d'un interosseux dorsal. Comme les interosseux il est fléchisseur de la première phalange, par action de la dossière, et extenseur des deux dernières phalanges par action de son expansion latérale.

Fig. 113

Fig. 114

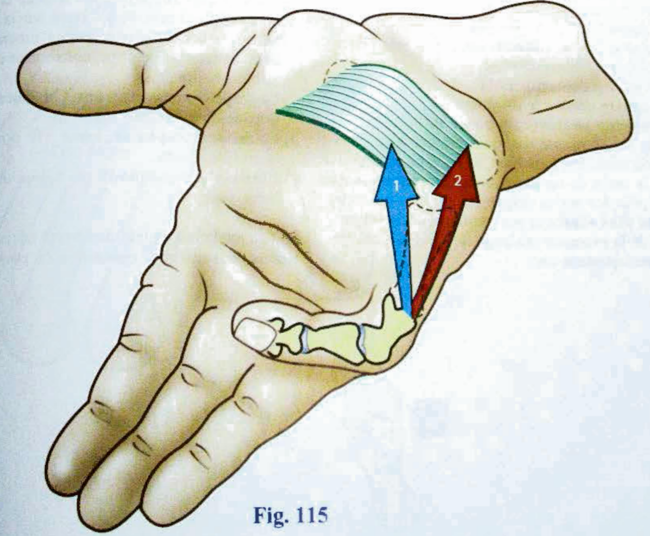


Fig. 115

Le pouce

Le pouce occupe une position et une fonction à part dans la main car il est **indispensable à la formation de pinces pollici-digitales** avec chacun des autres doigts, en particulier l'index, et aussi à la **constitution d'une prise de force avec les quatre autres doigts.** Il peut aussi prendre part à des **actions associées à des prises** concernant la même main. **Sans le pouce, la main perd la plus grande partie de ses possibilités.** Ce rôle éminent, le pouce le doit d'une part à sa situation en avant de la paume et des autres doigts (Fig. 116) lui permettant de se porter, dans le **mouvement d'opposition,** à la rencontre des autres doigts isolément ou globalement ou de s'en écarter par le mouvement de **contre-opposition** pour relâcher la prise. Il le doit d'autre part à sa grande souplesse fonctionnelle due à l'organisation très particulière de sa colonne ostéo-articulaire et de ses moteurs musculaires.

La **colonne ostéo-articulaire du pouce** (Fig. 117) comprend **cinq pièces osseuses** constituant le rayon externe de la main :

1) Le **scaphoïde** **S** ;
2) Le **trapèze** **T** dont les embryologistes font l'équivalent d'un métacarpien ;
3) Le **premier métacarpien** **M1** ;
4) La **première phalange du pouce** **P1** ;
5) La **deuxième phalange du pouce** **P2**.

Le pouce ne comporte anatomiquement **que deux phalanges,** mais, fait important, sa colonne est articulée avec la main en un **point beaucoup plus proximal** que pour les autres doigts. Sa colonne est donc **nettement plus courte** et son extrémité n'atteint que le milieu de la première phalange de l'index. Ceci est sa longueur optimum car :

- **S'il est plus court**, comme après une amputation phalangienne, il perd ses possibilités d'opposition par insuffisance de longueur, insuffisance d'écartement et insuffisance de flexion globale ;
- **S'il est plus long**, lorsque, par exemple, une malformation congénitale lui donne trois phalanges, l'opposition fine termino-terminale peut être gênée par l'insuffisance de flexion de l'inter-phalangienne distale du doigt avec lequel il s'oppose.

Ceci est donc une illustration du **principe d'économie universelle** (principe d'Occam), connu aussi sous le nom de **Rasoir d'Occam**, selon lequel toute fonction est assurée par le minimum de structure et d'organisation : pour une fonction optimum du pouce, **cinq pièces sont nécessaires et suffisantes**.

Les **articulations de la colonne du pouce** sont au nombre de **quatre** :

1) La **scapho-trapézienne** **ST** arthrodie qui, comme nous l'avons vu, permet au trapèze d'effectuer un court déplacement vers l'avant sur la facette inférieure laquelle s'appuie sur le tubercule du scaphoïde : ici s'amorce un mouvement de flexion de faible amplitude ;
2) La **trapézo-métacarpienne** **TM** dotée de deux degrés de liberté ;
3) La **métacarpo-phalangienne** **MP** possédant deux degrés de liberté ;
4) L'**inter-phalangienne** **IP** qui n'a qu'un degré de liberté.

Soit au total **cinq degrés de liberté** nécessaires et suffisants pour réaliser l'opposition du pouce.

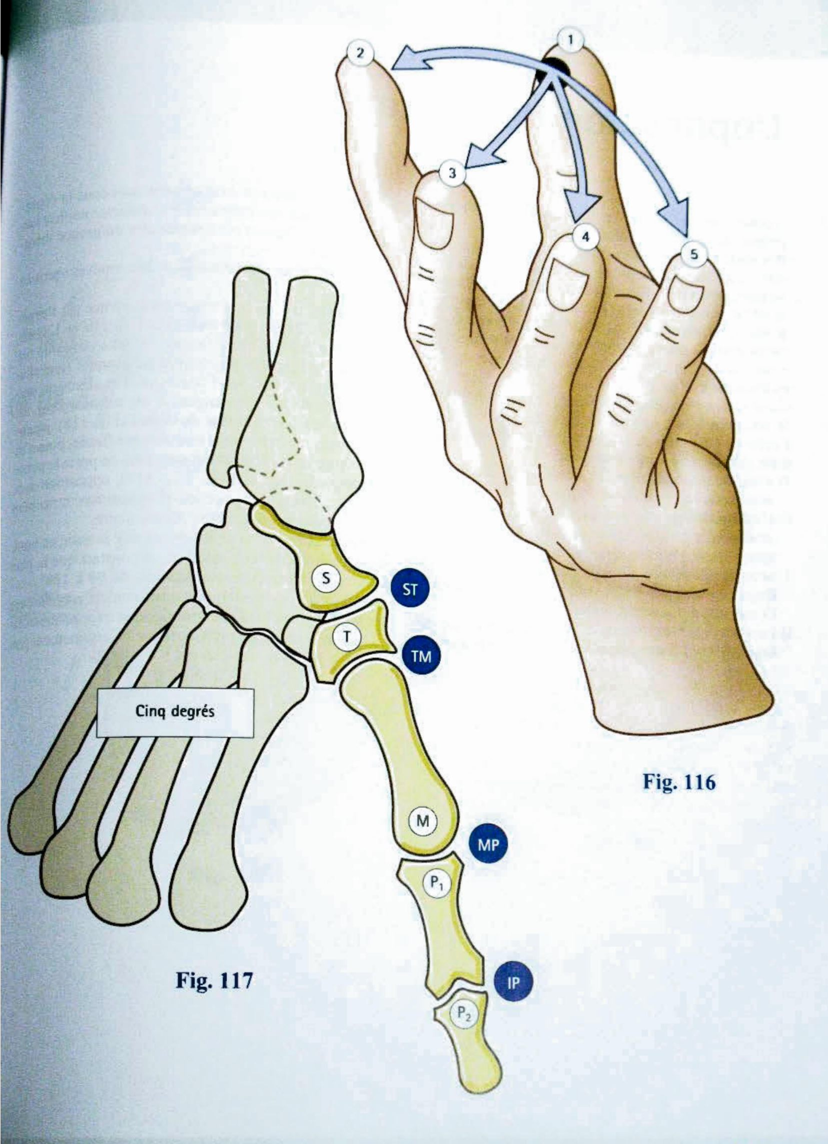


Fig. 116

Fig. 117

L'opposition du pouce

L'opposition du pouce est la **faculté de porter la pulpe du pouce au contact de la pulpe de chacun des quatre autres doigts** pour constituer ce qu'il est convenu d'appeler **la pince pollici-digitale** : ce mouvement représente l'essentiel de la valeur fonctionnelle de la main ; sa perte entraîne la quasi inutilité de la main, au point que des interventions chirurgicales complexes se donnent pour but de reconstituer cette pince en partant des éléments restants : opération de **pollicisation d'un doigt**.

Dans le mouvement d'opposition, le pouce se porte à la rencontre d'un autre doigt (voir plus loin p. 289), l'index le plus souvent. Cette action est la **somme de trois composantes élémentaires** :

1) L'**antépulsion** du premier métacarpien et accessoirement de la première phalange ;
2) L'**adduction du premier métacarpien** et l'inclinaison latérale de la première phalange sur le métacarpien vers son bord radial ; ces actions sont d'autant plus marquées que l'opposition s'effectue avec un doigt plus interne. Elles sont donc maximum pour l'opposition pouce-cinquième doigt ;
3) La **rotation longitudinale du métacarpien et de la première phalange** dans le sens de la **pronation**.

Les deux premières composantes sont sous la dépendance de l'action combinée de l'*abductor pollicis longus* (long abducteur) et des muscles du groupe thénarien externe.

La **rotation axiale** demande à être analysée plus en détail.

Elle peut être mise nettement en évidence par **l'expérience de Sterling Bunell** (Fig. 118, 119 et 120) facile à réaliser sur vous-mêmes : après avoir collé des repères sur les trois segments squelettiques (une allumette transversale sur l'ongle, et une allumette perpendiculaire aux phalanges et au métacarpien), on porte la main en position de départ (Fig. 118), paume largement ouverte, éminence thénar effacée, pouce en extension adduction maximum ; puis on porte le pouce en position intermédiaire (Fig. 119), opposition avec l'index ; enfin, en position d'opposition maximum (Fig. 120), opposition avec l'auriculaire.

Lorsque, devant un miroir, on regarde la main en bout, dans ces différentes positions, on constate que le plan de l'ongle a effectué une **rotation de 90 à 120°**.

Serait-ce à dire que cette rotation axiale s'est effectuée en totalité dans les deux articulations trapézo-métacarpienne et métacarpo-phalangienne ? Certainement pas.

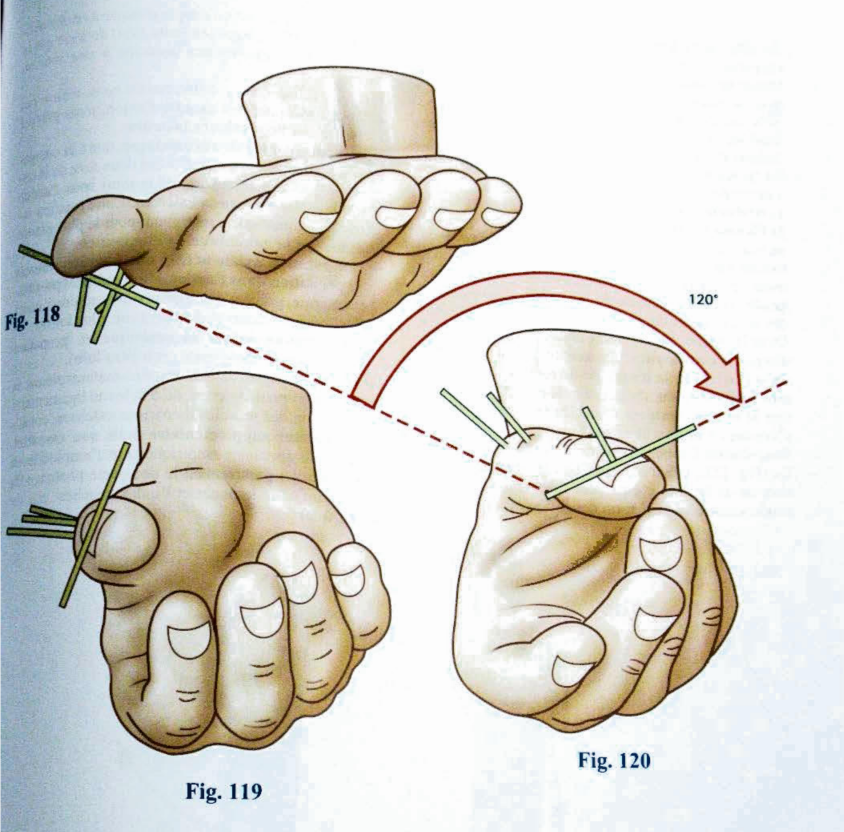


Fig. 119

Fig. 120

En effet, considérons (Fig. 121) un modèle de pouce (expérience personnelle par pliages-montages): la bande de carton représentant le pouce est articulée avec la paume par un axe O (abduction-adduction) et pliée sur trois lignes perpendiculaires à l'axe longitudinal de la bande représentant les trois articulations distales du pouce.

En faisant effectuer successivement deux mouvements à ce modèle de pouce:

1) **Abduction de 120°** autour de O;

2) **Flexion de 180°** autour des trois pliures;

on réalise une opposition: la flèche 3 se dirige directement vers les quatrième et cinquième doigts - sans avoir soumis la bande à aucun mouvement de torsion axiale: la rotation axiale est la résultante géométrique des mouvements combinés d'abduction et de flexion.

Dans la réalité, cependant, l'abduction ne peut, pour des raisons articulaires, dépasser 60°. Dans ces conditions (Fig. 122), la résultante de rotation axiale n'est plus suffisante pour diriger la troisième phalange (flèche 3) vers les derniers doigts; la troisième phalange s'oriente en dedans et en haut.

Pour réaliser l'opposition malgré cette abduction limitée (Fig. 123), il faut obligatoirement effectuer une torsion de la bande, c'est-à-dire une certaine rotation axiale associée à la flexion des différents segments.

Sur le modèle, un moyen simple consiste à rendre obliques les axes de flexion (en point tiret) de sorte que la flexion est obligatoirement associée à une rotation axiale.

Dans la réalité, cette rotation axiale ne se réalise pas grâce à l'obliquité des axes de flexion, mais grâce à l'**association de plusieurs facteurs**:

- Une **rotation axiale automatique**, due à la composition du mouvement autour des deux axes de la trapézo-métacarpienne (voir plus loin) sous l'action des muscles thénariens externes. Cette rotation active et automatique **e** intervient, pour la plus grande part, dans le mécanisme de l'opposition;
- Une **rotation axiale active**, due à un mouvement de **pronation dans l'articulation métacarpo-phalangienne**, grâce à des moteurs musculaires: court fléchisseur et court abducteur (voir plus loin);
- Une **rotation axiale automatique** en pronation dans l'inter-phalangienne (voir plus loin).

Le **jeu mécanique,** dans la trapézo-métacarpienne et la métacarpo-phalangienne, dû à la laxité ligamentaire sous l'action des muscles thénariens externes, constitue un **facteur supplémentaire mais non essentiel.** On peut en apprécier empiriquement l'amplitude en faisant tourner passivement la deuxième phalange du pouce droit entre le pouce et l'index gauches: elle est de 60° à 80°.

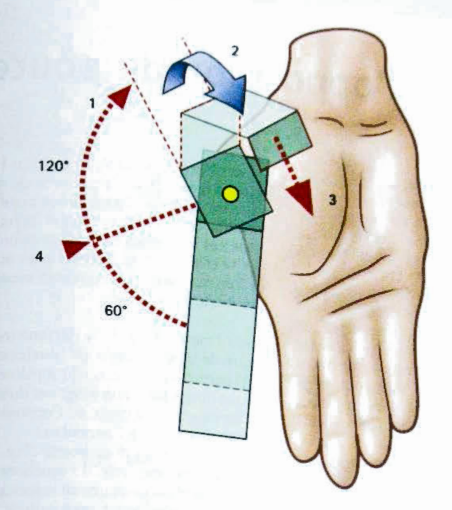


Fig. 121

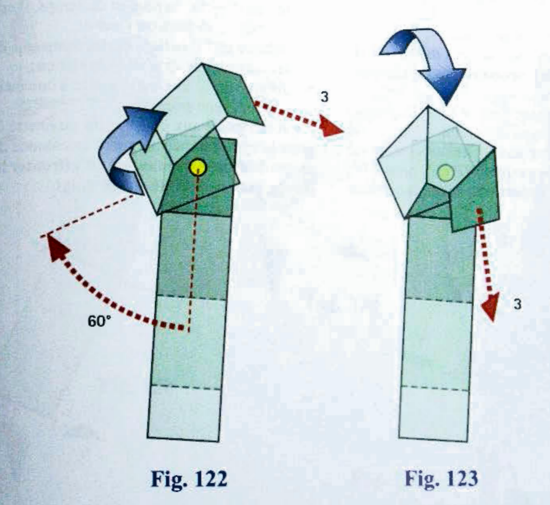


Fig. 122

Fig. 123

Géométrie de l'opposition du pouce

D'un point de vue strictement **géométrique** (Fig. 124), l'opposition du pouce consiste à rendre tangente, en un point donné A', la pulpe du pouce sur la pulpe d'un autre doigt, l'index par exemple, en un point A : c'est-à-dire faire coïncider dans l'espace en un seul point A + A' les plans pulpaires tangents A et A'.

Pour faire coïncider deux points dans l'espace (Fig. 125) il faut utiliser trois degrés de liberté, suivant les coordonnées X, Y et Z. Deux autres degrés de liberté sont ensuite nécessaires pour faire coïncider les plans pulpaires, plan sur plan et direction sur direction, par rotation autour des axes **t** et **u** (les pulpes ne pouvant se retourner dos à dos, un troisième degré autour d'un axe **v** perpendiculaire aux deux précédents est inutile).

Au total, la coïncidence des plans pulpaires nécessite **cinq degrés de liberté** :

- Trois pour la coïncidence des points de contact ;
- Deux pour la coïncidence plus ou moins poussée des plans pulpaires.

Comme on peut démontrer de façon simple que chaque axe d'une articulation constitue un degré de liberté qui s'additionne aux autres pour concourir au résultat final, il en découle que les **cinq degrés de liberté de la colonne du pouce sont nécessaires et suffisants** pour réaliser l'opposition.

Si l'on considère uniquement dans le plan (Fig. 127) le mouvement des trois segments mobiles M_1, P_1, et P_2 de la colonne du pouce autour des trois axes de flexion YY' pour la TM, f_1 pour la MP et f_2 pour l'IP, nous constatons que deux degrés sont nécessaires pour placer l'extrémité de P_2 en un point H du plan : si l'on bloque f_1 ou f_2, il n'y a qu'une seule manière dans chacun des deux cas d'atteindre le point H. Mais l'introduction d'un troisième degré permet d'atteindre H sous des incidences variées : deux orientations pulpaires O et O' sont ici figurées sous deux angles α et β et l'on voit que ce mécanisme nécessite trois degrés de liberté dans le plan.

Dans l'espace (Fig. 127) l'adjonction d'un quatrième degré de liberté, autour du deuxième axe Y_2Y_2' de la TM permet une orientation supplémentaire de la pulpe qui se dirige dans une direction différente, ce qui autorise un véritable choix de l'opposition avec un doigt donné de l'index à l'auriculaire.

Un cinquième degré de liberté (Fig. 128) apporté par un deuxième axe de la MP améliore encore la coïncidence des plans pulpaires en autorisant une rotation limitée d'un plan sur l'autre autour du point de tangence. En effet, on peut constater que l'axe de flexion f_1 de la MP n'est strictement transversal que lors de la flexion directe ; la plupart du temps, il est en réalité oblique dans un sens ou l'autre :

- Oblique en f_2 : la flexion s'accompagne d'une inclinaison cubitale et d'une supination ;
- Oblique en f_3, elle est associée à une inclinaison radiale et à une pronation.

Au total, grâce aux cinq degrés de liberté disponibles dans le système mécanique de la colonne du pouce, il existe de **multiples manières d'affronter la pulpe du pouce avec celle d'un autre doigt.**

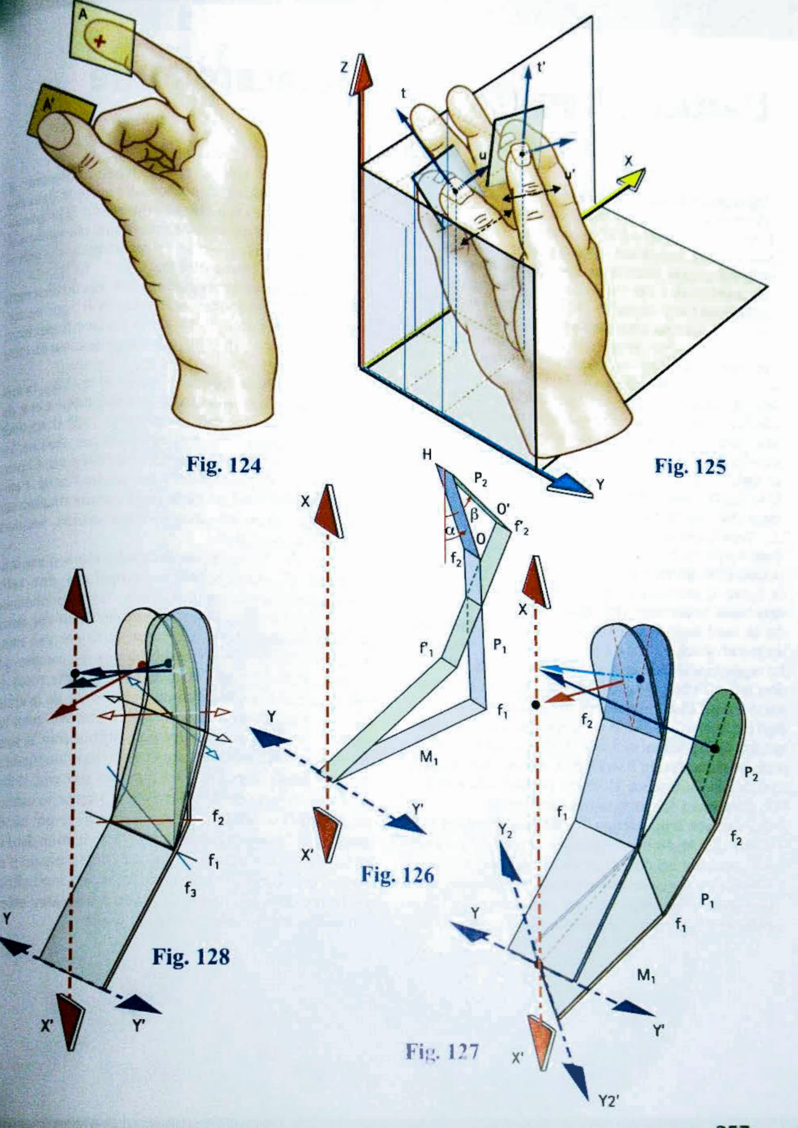


Fig. 124

Fig. 125

Fig. 126

Fig. 128

Fig. 127

L'articulation trapézo-métacarpienne

Topographie des surfaces

L'articulation trapézo-métacarpienne TM située à la base de la colonne mobile du pouce joue un rôle capital car elle **assure son orientation** et prend une **part prépondérante dans le mécanisme de l'opposition**. Les anatomistes l'ont appelée **articulation par emboîtement réciproque** ce qui ne veut pas dire grand chose, ou encore **articulation sellaire** (Fig. 129) ce qui est mieux car cela rappelle sa forme de selle, concave dans un sens et convexe de l'autre. Il existe, en effet, **deux surfaces en selle**, l'une sur la face distale du trapèze, l'autre sur la base du premier métacarpien. Elles ne peuvent se correspondre que grâce à une rotation de 90° faisant coïncider la courbure convexe de l'une avec la courbure concave de l'autre et vice versa.

Une étude topographique, très précise par coupes sériées et reconstitution, a été faite par un auteur italien, A. Caroli, qui montre (Fig. 130) qu'effectivement ces deux surfaces, la tropézienne **a** et la métacarpienne **b**, possèdent une double courbure inversée, qui rappelle la forme d'une selle d'équitation, mais les rayons de courbures présentent des variations locales, si bien qu'au total lorsqu'on les superpose **c**, la coïncidence n'est pas absolue.

La topographie exacte des surfaces de cette articulation a fait l'objet de nombreuses études et de débats passionnés. Une première description précise avait déjà été faite en 1974 par un auteur écossais, K. Kuczynski. La TM étant ouverte (Fig. 131) et la base du premier métacarpien basculée en dehors, les surfaces articulaires du trapèze **Tr** et du premier métacarpien **M1**, présentent les particularités suivantes :

- **La surface trapézienne T** présente une crête médiane **CD** légèrement incurvée suivant une concavité orientée en dedans et en avant. La partie dorsale **C** de cette crête est nettement plus convexe que sa partie palmaire F qui est presque plate. Cette crête est déprimée à sa partie moyenne par une dépression **AB** qui la croise transversalement et s'étend du bord dorsal externe **A** au bord palmaire interne **B** où il est nettement plus creux. Fait important, ce sillon est courbe présentant une convexité antéro-externe. La partie postéro-externe **E** est presque plane ;
- **La surface métacarpienne M1** est inversement conformée, présentant une crête **A'B'** qui correspond à la dépression **AB** de la surface trapézienne et une dépression **C'D'** qui s'applique sur la crête trapézienne **CD**.

Appliquée sur la surface trapézienne (Fig. 132), la métacarpienne la déborde aux deux extrémités **a** et **b** du sillon. En outre, sur une coupe (Fig. 133) il apparaît que la concordance des surfaces n'est pas absolue, les rayons de courbure étant légèrement différents. Cependant, appliquées fermement l'une contre l'autre, l'emboîtement des surfaces ne permet aucune rotation sur l'axe longitudinal du premier métacarpien, toujours selon K. Kuczynski.

En raison de l'incurvation de la selle sur son axe longitudinal, K. Kuczynski la compare à une selle (molle !) posée sur le dos d'un cheval scoliotique (Fig. 134). On peut aussi l'assimiler à un **col entre deux montagnes** (Fig. 135), parcouru par une route incurvée : la direction (flèche bleue) du camion qui monte forme un angle **R** avec celle (flèche rose) du même camion qui descend de l'autre côté de la crête. Pour K. Kuczynski, cet angle qui atteint 90° entre les points **A** et **B** du sillon trapézien expliquerait la rotation du premier métacarpien sur son axe longitudinal lors de l'opposition. Or, pour que ceci soit vrai, il faudrait que la base de M1 parcoure (comme le camion sur le col) la totalité du sillon trapézien, ce qui nécessiterait une luxation complète de l'articulation dans un sens ou/et dans l'autre, alors que le déplacement n'est que partiel ; l'essentiel de cette rotation longitudinale s'effectue donc, selon nous, **grâce à un autre mécanisme** que nous expliquerons plus loin.

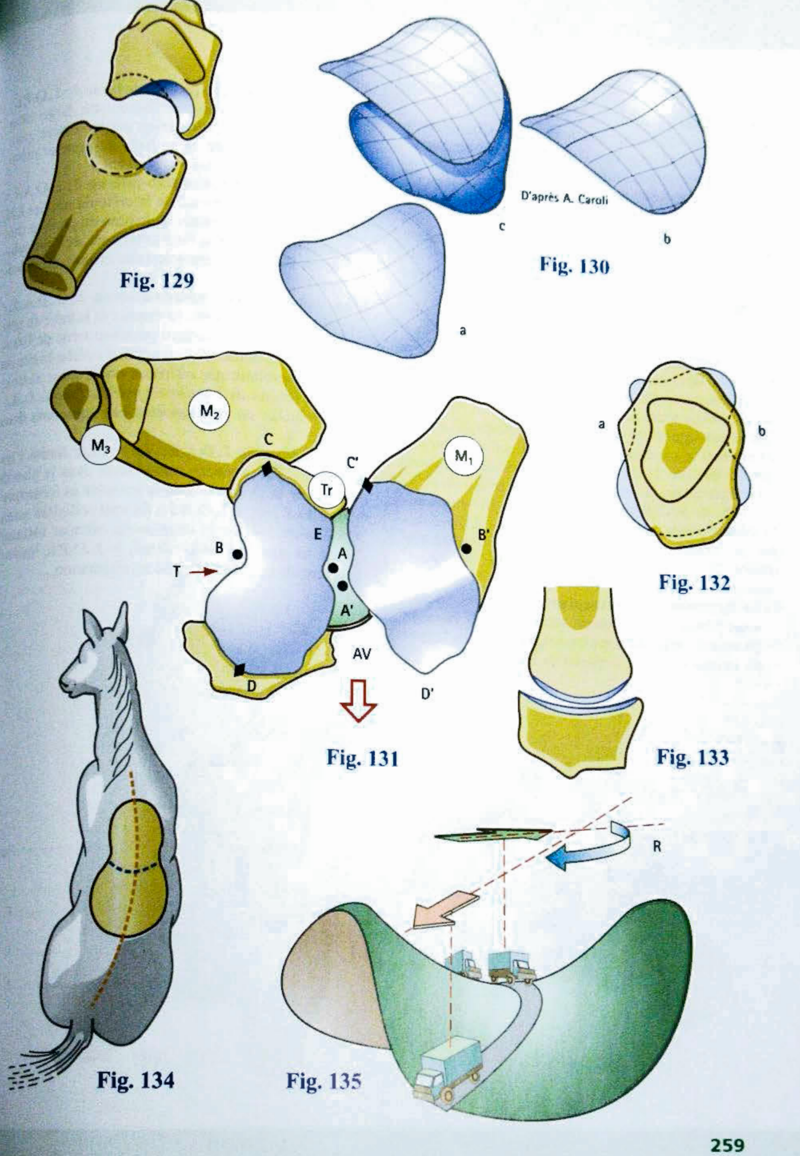


Fig. 129

Fig. 130

Fig. 131

Fig. 132

Fig. 133

Fig. 134

Fig. 135

Coaptation

La capsule de l'articulation trapézo-métacarpienne TM est réputée pour être lâche, autorisant un important jeu mécanique, origine selon les auteurs classiques et même selon certains modernes, de la rotation du premier métacarpien sur son axe longitudinal ce qui, nous le verrons, est faux.

En effet, la laxité capsulaire n'a pour effet en pratique que de permettre l'excursion de la surface métacarpienne sur la trapézienne, mais cette articulation **travaille en compression** un peu à la manière d'un pivot (Fig. 136) qui permet d'orienter le premier métacarpien dans toutes les directions de l'espace, comme un pylône dont on peut changer l'orientation en modifiant la tension des haubans qui correspondent ici aux muscles thénariens. Ceux-ci assurent donc la coaptation articulaire en toute position.

Quant aux ligaments de la trapézo-métacarpienne, ils conduisent le mouvement et assurent, suivant leur degré de tension, la coaptation dans chaque position. Leur description et leur rôle ont été précisés en 1970 par J.-Y. de la Caffinière. Malgré de nombreuses autres descriptions, celle-ci reste valable au moins en raison de sa cohérence et de sa simplicité. Il en distingue quatre (Fig. 137: vue antérieure, et 138: vue postérieure):

1) Le **ligament intermétacarpien** 4: **L.I.M.**: trousseau fibreux, épais, court, tendu entre la base du premier et celle du deuxième métacarpien, à la partie la plus haute de la première commissure;

2) Le **ligament oblique postéro-interne** 3: **L.O.P.I.**: décrit par les classiques, bandelette large mais mince, cravatant l'articulation par en arrière, pour s'enrouler en dedans de la base du premier métacarpien en se dirigeant vers l'avant;

3) Le **ligament oblique antéro-interne** 2: **L.O.A.I.**: tendu de la partie distale de la crête du trapèze à la zone juxta-commissurale de la base du premier métacarpien, il croise la face antérieure de l'articulation en s'enroulant dans le sens inverse du précédent;

4) Le **ligament droit antéro-externe** 1: **L.D.A.E.**: tendu directement entre le trapèze et la base du premier métacarpien à la face antéro-externe de l'articulation; sa limite interne nette et acérée limite un hiatus capsulaire par où passe une bourse séreuse vers le tendon de l'*abductor pollicis longus* L.A.

Pour cet auteur, on peut **associer ces ligaments deux à deux**:

- Le **L.I.M.** et le **L.D.A.E.**; le premier limite l'ouverture de la première commissure dans le plan de la paume alors que le second contrôle sa fermeture;
- Le **L.O.P.I.** et le **L.O.A.I.**; ils sont sollicités essentiellement lors de la rotation du premier métacarpien sur son axe longitudinal, le **L.O.P.I.** limitant sa pronation et le **L.O.A.I.** sa supination.

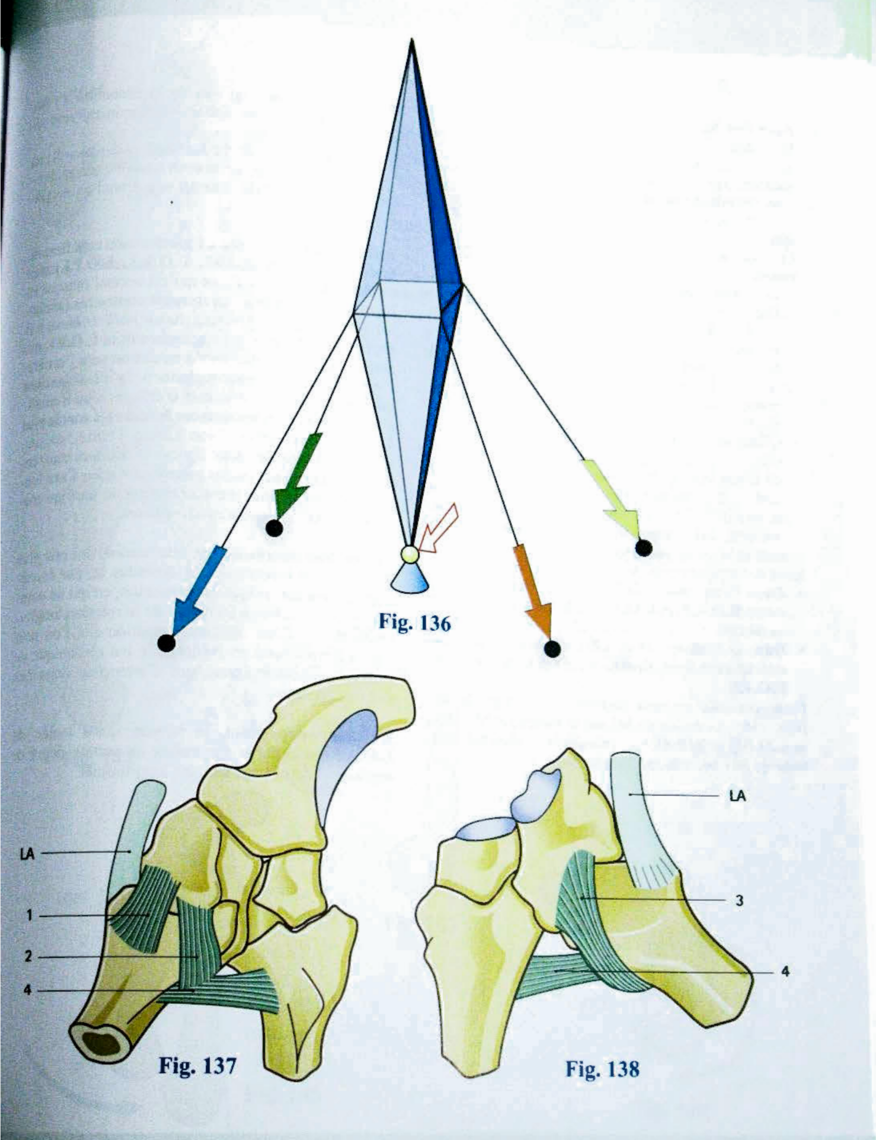

Fig. 136

Fig. 137
Fig. 138

Rôle des ligaments

En réalité, il nous semble que ces phénomènes sont un peu plus complexes, car il faut décrire l'action des ligaments **par rapport aux mouvements d'antéposition/rétroposition, et de flexion/extension** du premier métacarpien tels que nous les définirons plus loin.

Lors des mouvements d'anté et rétroposition, nous voyons :

- Sur **une vue antérieure en antéposition A** (Fig. 139), une tension du **L.O.A.I.** et un relâchement du **L.D.A.E.** tandis qu'en arrière (Fig. 140) l'antéposition **A** tend le **L.O.P.I.** ;
- Sur une **vue antérieure en rétroposition R** (Fig. 141), une tension du **L.D.A.E.** et un relâchement du **L.O.A.I.**, alors qu'en arrière (Fig. 142) la rétroposition **R** détend le **L.O.P.I.** ;
- Quant au **L.I.M., sur une vue antérieure** (Fig. 143), il est tendu aussi bien en antéposition **A**, où il tire la base de **M1** vers **M2**, qu'en rétroposition **R** où il retient la base de **M1** déjà subluxée sur le trapèze. C'est seulement en position moyenne, bissectrice de l'angle formé par les deux positions extrêmes du ligament qu'il est détendu.

Lors des mouvements de flexion-extension :

- **Dans l'extension E** (Fig. 144), les ligaments antérieurs **L.D.A.E.** et **L.O.A.I.** se tendent et le **L.O.P.I.** se détend ;
- **Dans la flexion F** (Fig. 145), l'inverse se produit : relâchement des **L.D.A.E.** et **L.O.A.I.**, et tension du **L.O.P.I.**

Étant enroulés en sens inverse sur la base de M1 (Fig. 146 : vue axiale de M1 sur le trapèze et M2 M3), le **L.O.P.I.** et le **L.O.A.I.** contrôlent la stabilité rotatoire de M1 sur son axe longitudinal.

- Le **L.O.A.I.** se tend lors de la pronation **P** ; par conséquent sa rétraction isolée entraînerait une supination.
- Le **L.O.P.I.** est sollicité lors de la supination **S** ; on peut donc dire que sa mise en tension indépendamment des autres entraînerait une pronation du premier métacarpien.

En opposition, qui associe l'antéposition et la flexion, tous les ligaments **(L.I.M., L.O.A.I., L.O.P.I.)** sont tendus sauf le **L.D.A.E.**, ce qui est normal puisque ce ligament est parallèle aux muscles contractés (*abductor pollicis brevis*, *opponens*, *flexor pollicis brevis*). Il est remarquable que le plus tendu soit le **L.O.P.I.** qui assure alors la stabilité de l'articulation vers l'arrière. L'opposition correspond donc à la ***close-packed position***, comme l'a déjà noté d'ailleurs Mac Conaill : c'est la position où les surfaces articulaires sont le plus fortement appliquées l'une contre l'autre, ce qui, ajouté au fait que les deux ligaments obliques sont tendus simultanément, exclut toute rotation sur l'axe longitudinal du premier métacarpien, donc tout jeu mécanique entre les surfaces articulaires.

En position intermédiaire, que nous définirons plus loin, tous les ligaments sont détendus et, par conséquent, le jeu mécanique est maximum, ce qui ne comporte aucun avantage au regard de la rotation longitudinale de **M**. C'est dans cette position que l'on peut mettre passivement en évidence le jeu mécanique de la trapézo-métacarpienne, qui n'intervient donc pas dans l'opposition.

En contre-opposition, la tension quasi isolée du **L.O.A.I.** est capable d'entraîner un certain degré de supination de **M1** sur son axe longitudinal.

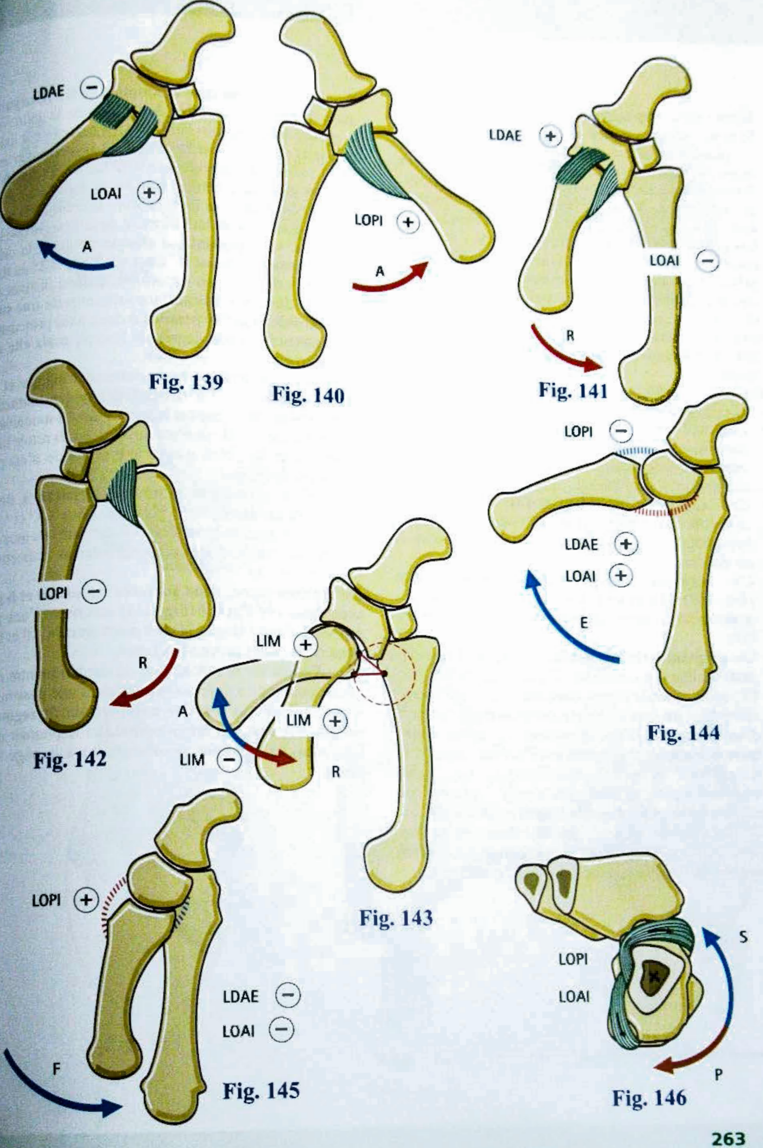


Fig. 139

Fig. 140

Fig. 141

Fig. 142

Fig. 143

Fig. 144

Fig. 145

Fig. 146

Géométrie des surfaces

Si la rotation du premier métacarpien sur son axe longitudinal ne peut être expliquée de façon satisfaisante ni par le jeu mécanique, ni par l'action des ligaments, il reste à la concevoir grâce aux propriétés des surfaces articulaires. Il faut remarquer ce mode d'explication n'est pas contesté dans le cas de la hanche.

Les surfaces sellaires – en forme de selle – possèdent comme disent les mathématiciens une **courbure négative**, c'est-à-dire qu'étant convexes dans un sens et concaves dans l'autre, elles ne peuvent se refermer sur elles-mêmes, comme la sphère, exemple parfait de courbure positive. On connaît mieux les **propriétés non euclidiennes** de ces surfaces depuis **Gauss** et **Riemann**.

On a voulu assimiler ces surfaces sellaires à :

- Un **segment d'hyperboloïde de révolution** (Fig. 147) comme Bausenhart et Littler : la surface (vert foncé) est engendrée par la révolution d'une hyperbole **HH** autour d'un axe, et s'appuyant sur deux cercles **S** ou bien à ;
- Un **segment d'hyperboloïde parabolique** (Fig. 148) : la surface (rose) est engendrée par une hyperbole **HH** qui s'appuie sur deux paraboles **P**, ou encore ;
- Un **segment d'hyperboloïde hyperbolique** (Fig. 149) : la surface (bleue) est engendrée une hyperbole **HH** s'appuyant sur deux autres hyperboles **H'** ;
- Un **segment axial de surface torique** (Fig. 150) nous semble une comparaison plus intéressante : sur la partie centrale d'une chambre à air, qui représente bien **un tore**, il existe une **courbure concave** dont le centre est l'axe de la roue **XX'** et une **courbure convexe** dont le centre est l'axe du « boudin ». En réalité il existe une série d'axes **p, q, s**… dont un **q** correspond au centre de la selle. Cette surfaee sellaire ou **surface toroïde négative**, découpée sur la partie axiale du tore, possède donc **deux axes principaux orthogonaux** et, par conséquent, **deux degrés de liberté** suivant les deux courbures.

Si l'on tient compte de la description de K. Kuczynski avec l'incurvation latérale de la crête de la selle – le « cheval scoliotique » (Fig. 134) – ce segment axial de surface torique doit être délimité asymétriquement (Fig. 151) sur le tore comme si la selle s'était **déformée en glissant latéralement** sur le dos d'un cheval normal. Le grand axe longitudinal, la crête de la selle **nm**, est bien incurvé latéralement de telle sorte que les rayons **u, v, w**, passant par chaque point de la crête convergent en un point **O'** situé sur l'axe **XX'** du tore en dehors de son plan de symétrie, donc distinct du centre O du tore. Cette surface sellaire reste **une surface toroïde négative** possédant deux axes principaux orthogonaux et deux degrés de liberté, **mais elle est asymétrique**.

Dans ces conditions, il est parfaitement logique et licite de **modéliser l'articulation trapézo-métacarpienne,** aussi bien que les biomécaniciens modélisent la hanche sous la forme d'une articulation à rotule bien qu'on sache fort bien que la tête fémorale n'est pas une sphère parfaite.

Le **modèle mécanique d'une articulation à deux axes** est le **cardan*** (Fig. 152) : deux axes **XX'** et **YY'** perpendiculaires et concourants autorisant des mouvements dans deux plans perpendiculaires respectivement AB et CD.

De la même façon, **deux surfaces sellaires a et b posées l'une sur l'autre** (Fig. 153) autorisent l'une par rapport à l'autre (Fig. 154) des mouvements **AB** et **CD** dans deux plans perpendiculaires.

Mais l'étude de la mécanique du cardan montre que les articulations à deux axes possèdent une possibilité supplémentaire, **la rotation automatique du segment mobile sur son axe longitudinal**, ici le premier métacarpien, ce que nous développerons à la page suivante.

* Du nom de **Gerolamo Cardano** (1501-1576) son inventeur

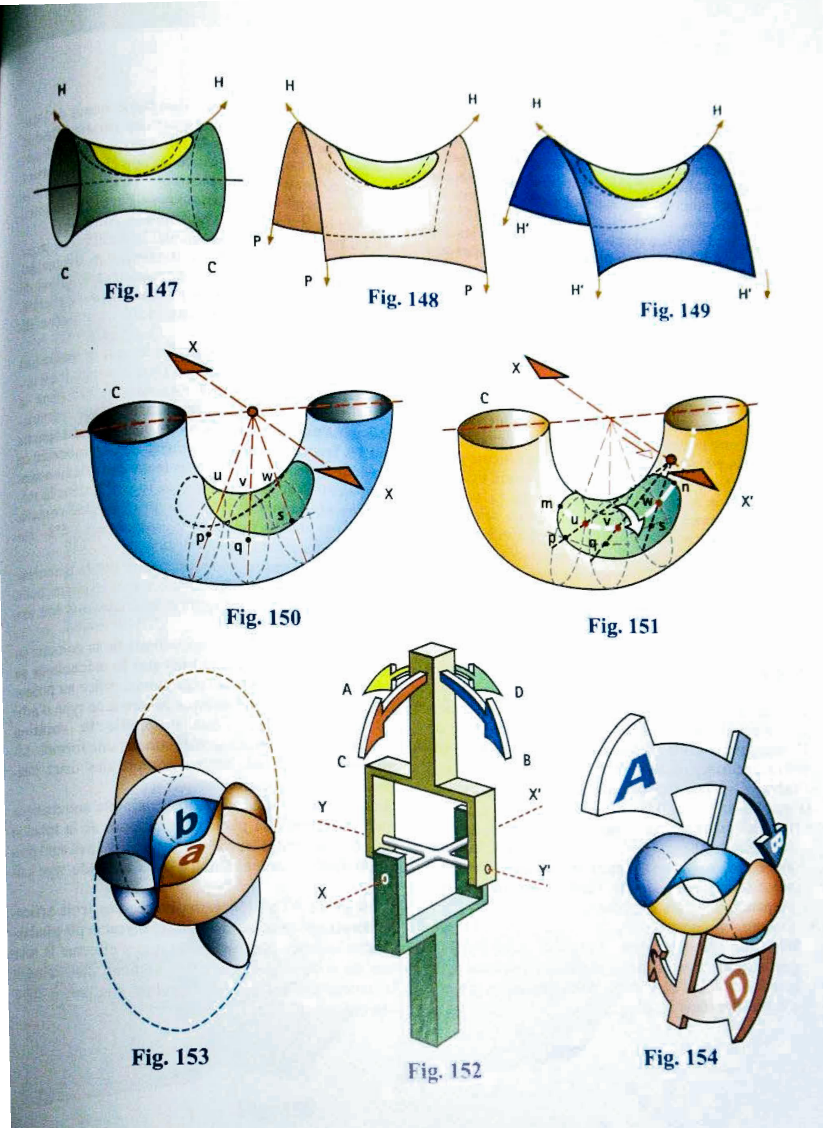


Fig. 147

Fig. 148

Fig. 149

Fig. 150

Fig. 151

Fig. 153

Fig. 152

Fig. 154

La rotation sur l'axe longitudinal

Pour comprendre les démonstrations de cette page, il est recommandé de construire avec du carton, par découpage et collage, un **modèle mécanique de colonne du pouce** comportant un **cardan** à sa base et trois segments articulés par **deux charnières** (Fig. 155). Le cardan modélise la trapézo-métacarpienne, et les deux charnières, la métacarpo-phalangienne et l'inter-phalangienne du pouce. Dans une bande de carton épais de 1 mm, il faut découper trois pièces. La pièce **T**, en bleu, représente le trapèze ; elle comporte une pliure, figurée par les tirets, qui joue le rôle de charnière. La deuxième pièce, en jaune, comporte trois pliures parallèles et dans le même sens, qui séparent **M**, le premier métacarpien, **P1** la première phalange, **P2** la deuxième. Pour obtenir des pliures nettes, il est recommandé d'effectuer, à l'aide d'une lame bien effilée, une incisure superficielle sur le dos du carton, ce qui permet la pliure sur l'autre face. La troisième pièce, en bleu et jaune, est un cercle de diamètre égal à la largeur de la bande. Sur chacune des faces, on trace un trait diamétral, en veillant à ce qu'ils soient perpendiculaires entre eux. À noter que ce modèle partiel est intégré dans le modèle mécanique complet de la main réalisable à la fin de cet ouvrage.

Lorsque les pièces sont prêtes, elles sont assemblées par collage. La pièce bleue sur une face du cercle, en faisant coïncider la pliure avec le trait diamétral. La jaune sur l'autre face du cercle, mais décalée de 90°, c'est-à-dire en faisant coïncider la pliure avec l'autre trait diamétral : ces deux pliures constituent le cardan.

Le modèle est prêt à fonctionner, et va nous permettre de matérialiser la rotation automatique autour de l'axe longitudinal du segment mobile, grâce aux propriétés mécaniques du cardan.

D'abord, on fait **fonctionner isolément le cardan** (Fig. 156, 157, 158, 159) :

- On mobilise ses deux charnières isolément, puis simultanément (Fig. 156) : sur la charnière **1**, la pièce jaune tourne en restant dans son plan. Sur la charnière **2**, la pièce jaune se déplace dans deux sens perpendiculaires à son plan ;
- Ensuite, on constate (Fig. 157) que lors de la mobilisation autour de l'axe **1**, la pièce jaune est dirigée toujours dans la même direction, au cours de sa rotation **a**. Il s'agit donc d'une **rotation plane**, c'est-à-dire dans un plan ;
- Si avant de mobiliser la pièce jaune autour de l'axe **1** (Fig. 158), on lui fait subir une certaine flexion préalable **a**, lorsqu'on la fait tourner suivant **b** autour de l'axe **1**, on constate qu'elle change d'orientation, mais qu'elle est toujours dirigée vers le même point **O**, sommet du cône décrit par la pièce mobile. Il s'agit là d'une **rotation conique** ;
- En poussant la flexion préalable de la pièce jaune jusqu'à 90° (Fig. 159), son orientation évolue degré par degré par rapport à la rotation **R** autour de l'axe **1**. C'est une **rotation cylindrique**, qui préfigure la rotation longitudinale de la colonne du pouce.

On peut maintenant comprendre ce qui se passe lors de l'opposition du pouce (Fig. 160). Comme il est impossible de réaliser une flexion de 90° dans le deuxième axe de la trapézo-métacarpienne, matérialisé par l'axe **2** du cardan, **cette flexion est répartie sur les trois charnières** : première flexion modérée du premier métacarpien **M1** dans le cardan ; flexion supplémentaire sur la première phalange **P1**, dans la métacarpo-phalangienne (axe **3**) ; enfin, flexion complémentaire de la deuxième phalange **P2** sur l'inter-phalangienne (axe **4**).

De la sorte, la pulpe du pouce, portée par la deuxième phalange, peut s'orienter toujours vers le même point **O** en subissant une rotation cylindrique sur son axe longitudinal.

Au total, cette rotation longitudinale de la colonne du pouce est **déterminée à sa base par le mécanisme de cardan** de la trapézo-métacarpienne, grâce au phénomène de rotation automatique propre à ce type d'articulation que Mac Conaill appelle **la rotation conjointe**. On peut la calculer suivant une formule trigonométrique simple tenant compte des deux rotations, que nous ne citerons pas ici.

Bien entendu, entre la rotation conjointe automatique nulle de la rotation plane et maximum de la rotation cylindrique, toutes les valeurs intermédiaires sont possibles dans les articulations à deux axes, du type cardan.

C'est grâce à l'action coordonnée des trois articulations trapézo-métacarpienne, métacarpo-phalangienne et inter-phalangienne que s'effectue la rotation du pouce sur son axe longitudinal, mais c'est de la trapézo-métacarpienne, **la reine**, que part le mouvement.

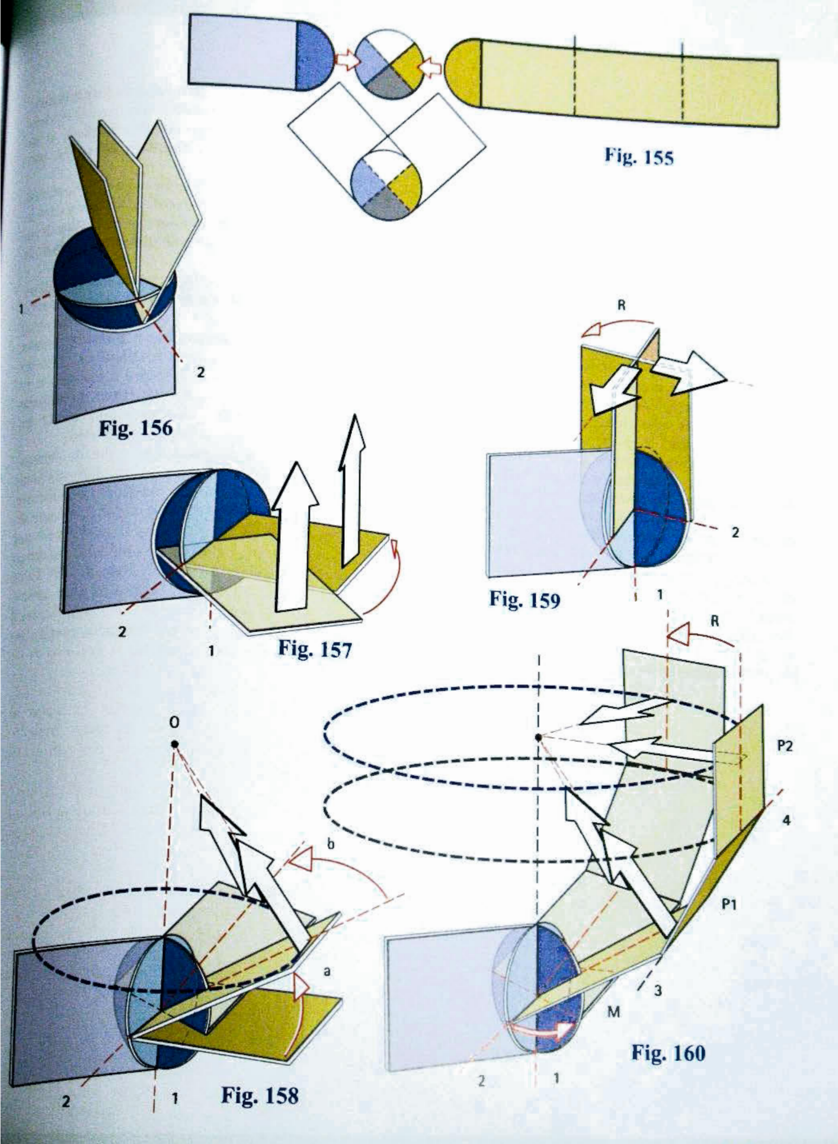


Fig. 155
1
2
Fig. 156
R
2
1
Fig. 159
2
1
Fig. 157
O
b
a
2
1
Fig. 158
R
P2
4
P1
3
M
2
1
Fig. 160

Les mouvements du premier métacarpien

Le premier métacarpien peut donc effectuer isolément ou simultanément des mouvements autour de deux axes orthogonaux et un mouvement de rotation sur son axe longitudinal **qui résulte des mouvements précédents.** Encore reste-t-il à définir **la position dans l'espace des deux axes principaux de la trapézo-métacarpienne**, qui ne sont **pas compris dans les trois plans de référence** habituels.

Sur une **préparation anatomique** (Fig. 161) si l'on insère une broche métallique au niveau du centre de la courbure moyenne de chacune des surfaces trapézienne et métacarpienne, on matérialisera :

- Dans la base du premier métacarpien, l'axe **1** correspondant à la courbure concave du trapèze ;
- Dans le trapèze, l'axe **2** correspondant à la courbure concave de la selle métacarpienne.

Bien entendu, dans la réalité vivante, ces axes ne sont pas immuables mais mobiles, évolutifs au cours même du mouvement, la broche ne représentant qu'une position moyenne. En première approximation cependant, on peut dans un but de modélisation, c'est-à-dire de représentation partielle de la réalité et pour faciliter la compréhension d'un phénomène complexe, les considérer comme les deux axes de la trapézo-métacarpienne. Ils constituent, comme nous l'avons vu, un cardan, car ils sont **orthogonaux**, c'est-à-dire perpendiculaires entre eux dans l'espace et non concourants, ce qui permet de dire que l'articulation possède les propriétés mécaniques d'un cardan.

On note en outre **deux caractéristiques importantes** :

- D'une part, l'axe **1** est parallèle aux axes de flexion-extension de la métacarpo-phalangienne **3**, et de l'inter-phalangienne **4**, disposition dont nous verrons les conséquences ;
- D'autre part, l'axe **1**, orthogonal à l'axe **2**, l'est aussi à **3**, ainsi qu'à **4** et se trouve donc compris dans le plan de flexion de la première et de la deuxième phalange, c'est-à-dire **dans le plan de flexion de la colonne du pouce**.

Enfin, fait essentiel, les deux axes **1** et **2** de la trapézo-métacarpienne sont **obliques par rapport aux trois plans de référence** : frontal **F**, sagittal **S** et transversal **T**. Il s'ensuit que les **mouvements purs** du premier métacarpien s'effectuent dans des plans obliques par rapport aux trois plans de référence classiques et ne peuvent donc être désignés par les termes inventés par les anciens anatomistes, tout au moins en ce qui concerne l'abduction dont le plan est frontal.

De récents travaux précisent que l'axe de flexion-extension du premier métacarpien est bien situé dans le trapèze, que l'axe d'abduction-adduction se localise dans la base du métacarpien, et qu'ils sont très peu séparés l'un de l'autre. Par contre, ils ne forment pas dans l'espace un angle droit et ne sont donc pas orthogonaux, mais forment **un angle voisin de 42°**. Cette articulation peut toujours être assimilée à un cardan, mais il n'est plus homocinétique ; cela signifie, qu'il fonctionne dans des secteurs préférentiels, ce qui s'accorde très bien avec sa physiologie.

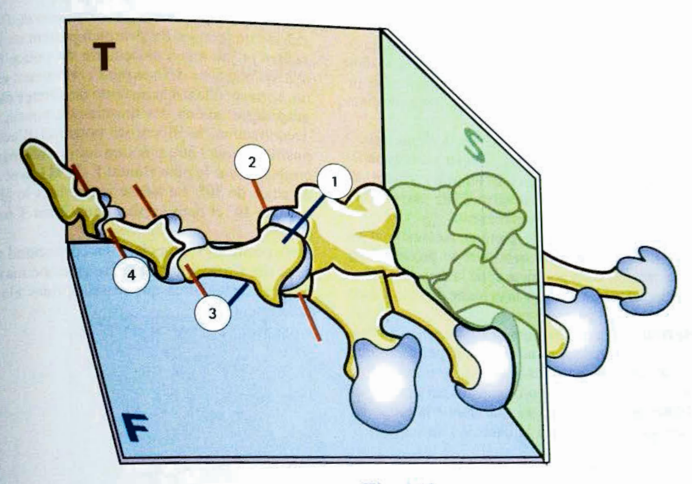


Fig. 161

La **définition des mouvements purs du premier métacarpien** (Fig. 162) dans le **système de référence trapézien** s'établit donc ainsi :

- **Autour de l'axe XX'** (l'axe **1** de la figure précédente), que nous appellerons **principal**, car c'est grâce à lui que le pouce « choisit » le doigt auquel il va s'opposer, s'effectue un **mouvement d'antéposition/rétroposition** au cours duquel la colonne du pouce se déplace dans un plan AOR perpendiculaire à cet axe **1** et parallèle à celui de l'ongle du pouce :
  - la **rétroposition R** porte le pouce en arrière pour l'amener dans le plan de la paume, écarté de 60°environ du deuxième métacarpien ;
  - l'**antéposition A** porte le pouce en avant, presque perpendiculaire au plan de la paume dans une position que les auteurs anglophones nomment abduction (ce qui n'est pas fait pour clarifier les choses).
- **Autour de l'axe YY'** (l'axe **2** de la figure précédente), que par référence au premier nous appellerons **secondaire**, s'effectue un mouvement de flexion/extension dans un plan FOE perpendiculaire à l'axe **2** et au plan précédent.
  - l'**extension E** porte le premier métacarpien en haut, en arrière et en dehors et se prolonge par l'extension de la première et de la deuxième phalange, amenant presque la colonne du pouce dans le plan de la paume ;
  - la **flexion F** porte le premier métacarpien en bas, en avant et en dedans, ne dépassant pas dans cette direction le plan sagittal passant par le deuxième métacarpien, mais se prolongeant par contre par la flexion des phalanges qui amène la pulpe au contact de la paume à la base de l'auriculaire.

La **notion de flexion-extension du premier métacarpien** est ainsi **parfaitement justifiée** par sa complémentarité avec le mouvement homologue dans les deux autres articulations de la colonne du pouce.

En dehors de ces mouvements purs d'anté et rétroposition et de flexion/extension, tous les autres mouvements du premier métacarpien sont des **mouvements complexes** qui associent à des degrés divers des mouvements autour des deux axes, soit successifs, soit simultanés et qui, comme nous l'avons précédemment démontré, intègrent une rotation automatique ou rotation conjointe sur l'axe longitudinal, qui joue un rôle essentiel dans l'opposition du pouce.

Les mouvements de flexion-extension et d'anté-rétropulsion du premier métacarpien partent de la **position neutre** ou de repos musculaire du pouce (Fig. 163), telle qu'elle a été définie par C. Hamonet et P. Valentin, correspondant à la position de **silence électromyographique** : aucun des muscles du pouce, en état de décontraction, ne libère de potentiel d'action. Cette **position N** peut être précisée sur des radiographies : la projection sur le plan frontal **F** de **M1** avec **M2** forme un angle de **30°**. Le même angle dans le plan sagittal **S** est de **40°** et dans le plan transversal **T** (ou coronal) de **40°**.

Cette position **N**, rappelons-le, correspond au relâchement des ligaments et à la congruence maximum des surfaces articulaires qui se recouvrent alors presque exactement.

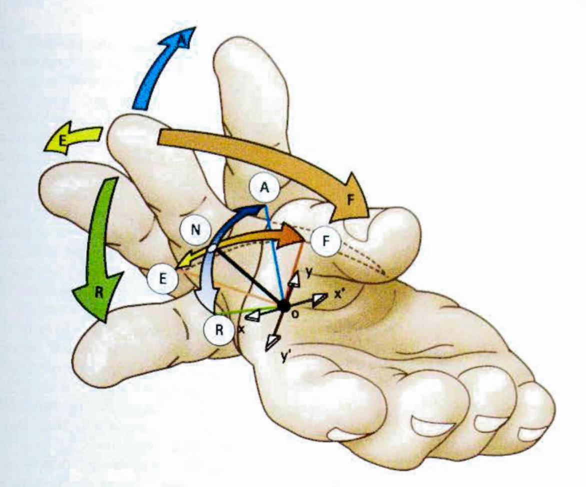


Fig. 162

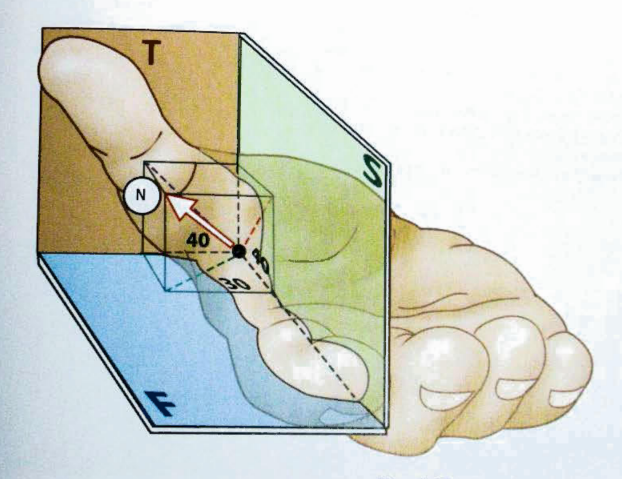


Fig. 163

La cotation des mouvements du premier métacarpien

Les mouvements réels du premier métacarpien ayant été ainsi définis, comment les évaluer dans la pratique ? Trois systèmes sont en concurrence, ce qui n'est pas fait pour clarifier le problème.

Le **premier système de cotation** qu'on pourrait appeler **classique** (Fig. 164) où le premier métacarpien évolue dans un trièdre de référence rectangulaire constitué par les trois plans perpendiculaires, transversal T, frontal F et sagittal S, ces deux derniers se coupant sur l'axe longitudinal du deuxième métacarpien et l'intersection des trois plans se situant au niveau du centre de la trapézo-métacarpienne. La position de référence est réalisée lorsque le premier métacarpien **est collé au deuxième dans le plan de la paume**, en gros, dans le plan F. Deux remarques s'imposent :

- Cette position n'est pas naturelle et ;
- Le premier métacarpien ne peut être strictement parallèle au second.

L'**abduction** (flèche 1) est l'écartement du premier par rapport au deuxième métacarpien dans le plan F, l'adduction, ou rapprochement, le mouvement inverse.

La **flexion** (flèche 2), ou avancée, est le mouvement qui porte le premier métacarpien en avant, l'extension, ou recul, l'inverse.

La position du premier métacarpien se définit ainsi par deux angles (Fig. 165) : l'abduction **Ab.** et son opposé l'adduction **Add.** définies par l'angle **a** et la flexion, ou avancée A, et son opposé l'extension ou recul **R**, définies par l'angle **b**.

Ce système présente deux inconvénients :

- On mesure des projections sur des plans abstraits et non des angles réels ;
- La rotation sur l'axe longitudinal n'est pas évaluée.

Le **deuxième système de cotation**, qu'on pourrait appeler **moderne** (Fig. 166), proposé par J. Duparc, J.-Y. de la Caffinière et H. Pineau, ne définit pas des mouvements mais des positions du premier métacarpien selon un système de coordonnées polaires.

La situation du premier métacarpien est définie par sa position sur un cône dont l'**axe** est confondu avec l'axe longitudinal du deuxième métacarpien et le **sommet** se situe au niveau de la trapézo-métacarpienne. Le demi-angle au sommet du cône (flèche 1) est l'**angle d'écartement**, valable lorsque le premier métacarpien se déplace sur la surface du cône. Sa position sur le cône est précisée sans ambiguïté par l'angle (flèche 2) que forme le plan passant par l'axe des deux premiers métacarpiens avec le plan frontal **F**.

Par rapport au trièdre de référence (Fig. 167), cet angle **b** est appelé par les auteurs **angle de rotation spatiale** ce qui est une tautologie car toute rotation ne peut se faire que dans l'espace. Il semblerait plus indiqué de le nommer **angle de circumduction**, car le déplacement du premier métacarpien sur la surface du cône est une circumduction.

L'intérêt de ce système de cotation, par rapport au premier, c'est que ces deux angles sont assez faciles à mesurer avec un rapporteur.

Fig. 165

Fig. 164

Fig. 167

Fig. 166

La radiographie de la trapézo-métacarpienne et le système trapézien

Cette page est basée sur des **études radiographiques** à partir de clichés de face et de profil pris en **incidences spécifiques** telles qu'elles ont été définies par l'auteur en 1980. Le principe consiste à modifier le rayon principal pour tenir compte de l'obliquité des axes de l'articulation et représenter les surfaces articulaires, dans leurs **courbures réelles, sans déformation de perspective**, comme dans les incidences dites classiques de la main de face et de profil. On peut ainsi mesurer de façon précise, non seulement les amplitudes des mouvements purs de la trapézo-métacarpienne, mais aussi ses caractéristiques morphologiques, qui jouent un grand rôle dans sa physiologie et sa pathologie.

Grâce aux radiographies prises en incidences spécifiques de face et de profil nous proposons donc un **troisième système de cotation des amplitudes** de cette articulation, le **système de référence trapézien** :

Sur un **cliché de face de la colonne du pouce** (Fig. 168), la courbure concave du trapèze et la courbure convexe du premier métacarpien sont vues strictement de profil, sans aucun effet de perspective. Un cliché est pris en rétroposition **R** et un en Antéposition **A**. Les amplitudes sont mesurées entre les axes longitudinaux du premier et du deuxième métacarpien.

La soustraction du chiffre de la rétroposition du chiffre de l'antéposition définit **la course d'anté-rétropulsion** :

- La rétroposition amène l'axe du premier métacarpien à devenir presque parallèle à celui du deuxième ;
- L'antéposition ouvre l'angle entre les deux premiers métacarpiens jusqu'à 50-60°.

La **course d'anté-rétropulsion** est de 22° ± 9° avec une différence suivant les sexes :

- Chez l'homme : 19°±8° ;
- Chez la femme : 24°±9°.

Sur un **cliché de profil de la colonne du pouce** (Fig. 169), la courbure convexe du trapèze et la courbure concave du métacarpien sont vues sans aucune déformation de perspective. Un cliché est pris en extension **E** et un en flexion **F** :

- L'extension écarte le premier du deuxième métacarpien formant un angle de 30-40° ;
- La flexion le rapproche du deuxième et le rend presque parallèle.

La **course de flexion-extension** est de 17° ± 9° avec une différence suivant les sexes :

- Chez l'homme : 16°±8° ;
- Chez la femme : 18°±9°.

En définitive, l'amplitude des mouvements dans la trapézo-métacarpienne est plus réduite que ne le laisserait supposer la grande mobilité de la colonne du pouce.

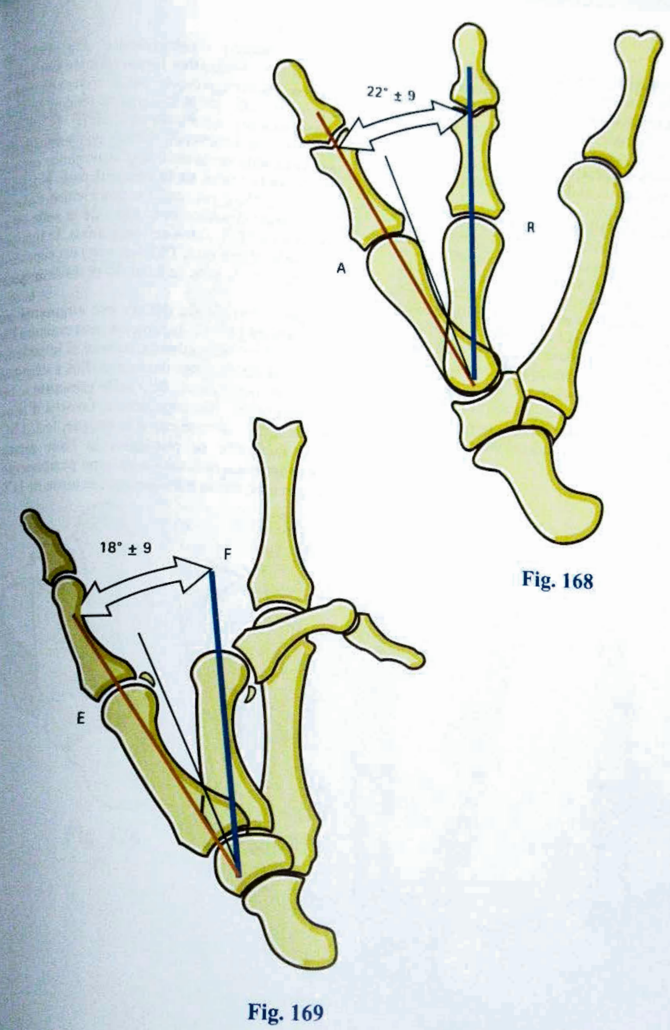


Fig. 168

Fig. 169

Les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles de la trapézo-métacarpienne

Des **études morphologiques et dynamiques** ont été effectuées en 1993 par A.I Kapandji & T. Kapandji sur 330 dossiers et permettent de préciser :

- La **mobilité du trapèze** (Fig. 169) est de 2°9 ± 2° entre l'antépulsion **A** et la rétropulsion **R** : amplitude faible mais réelle ;
- La **dynamique de la base métacarpienne** : en **rétroposition** (Fig. 170) la base métacarpienne est en position de sub-luxation externe sur la selle trapézienne, alors qu'en **antéposition** (Fig. 171) cette base réintègre parfaitement la concavité de la selle.
- Un **début de rhizarthrose** (Fig. 172) se manifeste sur les clichés de face par le signe de la **réintégration imparfaite de la base métacarpienne**, qui reste accrochée sur le troussequin (saillie externe) de la selle lors de l'antépulsion ;
- Alors que, normalement, sur les clichés de profil (Fig. 173), le bec de la base métacarpienne se réintègre parfaitement sur la courbure convexe du trapèze ;
- Dans le **début de rhizarthrose** (Fig. 174), on constate la **réintégration imparfaite du bec métacarpien**, qui reste accroché sur la convexité du trapèze, sous l'effet de la traction du tendon de l'*abductor pollicis longus* **LA** (en blanc) ;
- La mesure, sur les clichés de face, de **l'angle de dévers de la selle** se révèle d'une importance capitale dans le **stade initial de la rhizarthrose**. Normalement (Fig. 175), cet angle mesuré entre l'axe du deuxième métacarpien et la ligne de la selle est en moyenne de 127°. Dans ces conditions, le ligament inter-métacarpien ou L.I.M. (en vert) est capable de réintégrer sur la selle la base du premier métacarpien ;
- Lorsque cet **angle de dévers est augmenté aux alentours de 140°** (Fig. 176), on peut craindre l'apparition d'une Rhizarthrose, surtout si le patient se plaint déjà de douleurs occasionnelles à ce niveau. Cet état constitutionnel de « **selle glissante** », cette dysplasie de la selle trapézienne, favorise l'apparition de la rhizarthrose car, à la longue, le L.I.M. se révèle incapable de réintégrer la base métacarpienne dont la sub-luxation externe permanente va finir par user, amincir l'interligne externe de la T.M.

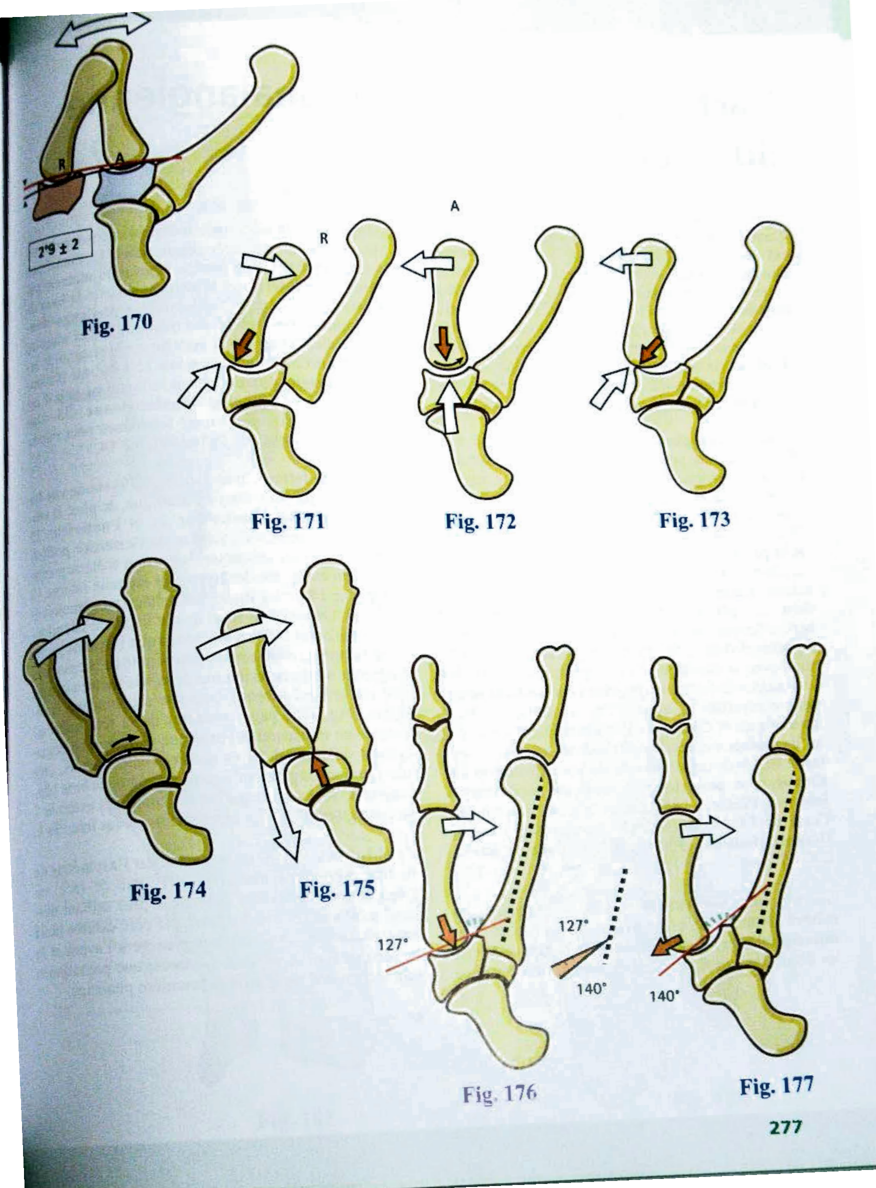


Fig. 170

Fig. 171

Fig. 172

Fig. 173

Fig. 174

Fig. 175

Fig. 176

Fig. 177

L'articulation métacarpo-phalangienne du pouce

L'articulation métacarpo-phalangienne du pouce est considérée par les anatomistes comme une **condylienne**, une ovoïde disent les auteurs anglophones. Elle possède donc, comme toutes les condyliennes, **deux degrés de liberté**, la flexion-extension et la latéralité. En réalité, sa biomécanique complexe y associe un troisième degré de liberté, la **rotation sur son axe longitudinal** de la première phalange soit en supination, soit en pronation, mouvement non seulement passif, mais aussi et surtout actif indispensable dans l'opposition.

La **métacarpo-phalangienne** étant ouverte en avant (Fig. 177) et la première phalange étant rabattue en haut et en arrière, la **tête métacarpienne 1** apparaît convexe dans les deux sens, plus longue que large, prolongée en avant par deux épaulements asymétriques, l'interne **a** étant plus saillant que l'externe **b**. **La base de la première phalange** est occupée par une surface cartilagineuse **2** concave dans les deux sens et son bord antérieur donne insertion au **fibro-cartilage glénoïdien 3** ou **plaque palmaire** qui contient près de son bord inférieur les **deux os sésamoïdes,** l'interne **4** et l'externe **5** dont la facette cartilagineuse est en continuité avec le cartilage de la plaque palmaire. Sur les sésamoïdes se fixent les **muscles sésamoïdiens internes 6** et **externes 7**. La tranche de la capsule **8** est marquée de part et d'autre par l'épaississement formé par les **ligaments métacarpo-glénoïdiens interne 9** et **externe 10**. On distingue les **culs-de-sac capsulaires antérieur 11** et **postérieur 12**, ainsi que les **ligaments latéraux, l'interne 13** plus court et plus vite tendu que **l'externe 14**. Les flèches **XX'** matérialisent **l'axe de flexion-extension,** et la flèche **YY' l'axe de latéralité**.

Sur une **vue antérieure** (Fig. 178) se retrouvent les mêmes éléments : le **métacarpien 15** en bas, la **première phalange 16** en haut, mais on distingue mieux les détails de la plaque palmaire avec le fibrocartilage glénoïdien **3**, le sésamoïde interne **4** et l'externe **5** reliés par le **ligament inter-sésamoïdien 17**, rattachés à la tête métacarpienne par les **ligaments métacarpo-glénoïdiens interne 18** et **externe 19** et à la base de la première phalange par les **fibres phalango-sésamoïdiennes directes 20** et **croisées 21**. Les muscles sésamoïdiens internes **6** s'insèrent sur le sésamoïde interne et envoient une **expansion 22** à la base phalangienne masquant partiellement le ligament latéral interne **13**. L'**expansion phalangienne 23** des sésamoïdiens externes **7** a été sectionnée pour mieux laisser voir le ligament latéral externe **14**.

Sur une **vue latérale interne** (Fig. 179) et une **vue latérale externe** (Fig. 180) on distingue, de plus, le **cul-de-sac capsulaire postérieur 24** et l'**antérieur 25** ainsi que l'insertion du tendon de l'***extensor pollicis brevis* 26** et l'on remarque l'insertion métacarpienne nettement excentrée des ligaments latéraux interne **13** et externe **14** et des ligaments métacarpo-glénoïdiens **18** et **19**. On constate aussi que le ligament latéral interne plus court est plus vite tendu que l'externe ce qui conditionne un déplacement plus limité de la base phalangienne sur le bord interne de la tête métacarpienne que sur le bord externe. Une vue schématique supérieure (Fig. 185, page suivante) de la tête métacarpienne (en transparence) explique comment ce déplacement différentiel, **SI** en dedans, **SE** en dehors, crée une rotation longitudinale en pronation de la base phalangienne surtout lorsque les sésamoïdiens externes **7** se contractent plus vigoureusement que les internes **6**.

Ce phénomène est encore accentué par l'**asymétrie de la tête métacarpienne** (Fig. 181 : vue de face) où **l'épaulement antérieur interne a** plus saillant descend moins bas que l'**externe b** : le côté externe de la base phalangienne se déplace plus vers l'avant et le bas ce qui, lors de la flexion, associe une pronation et une inclinaison radiale de la première phalange.

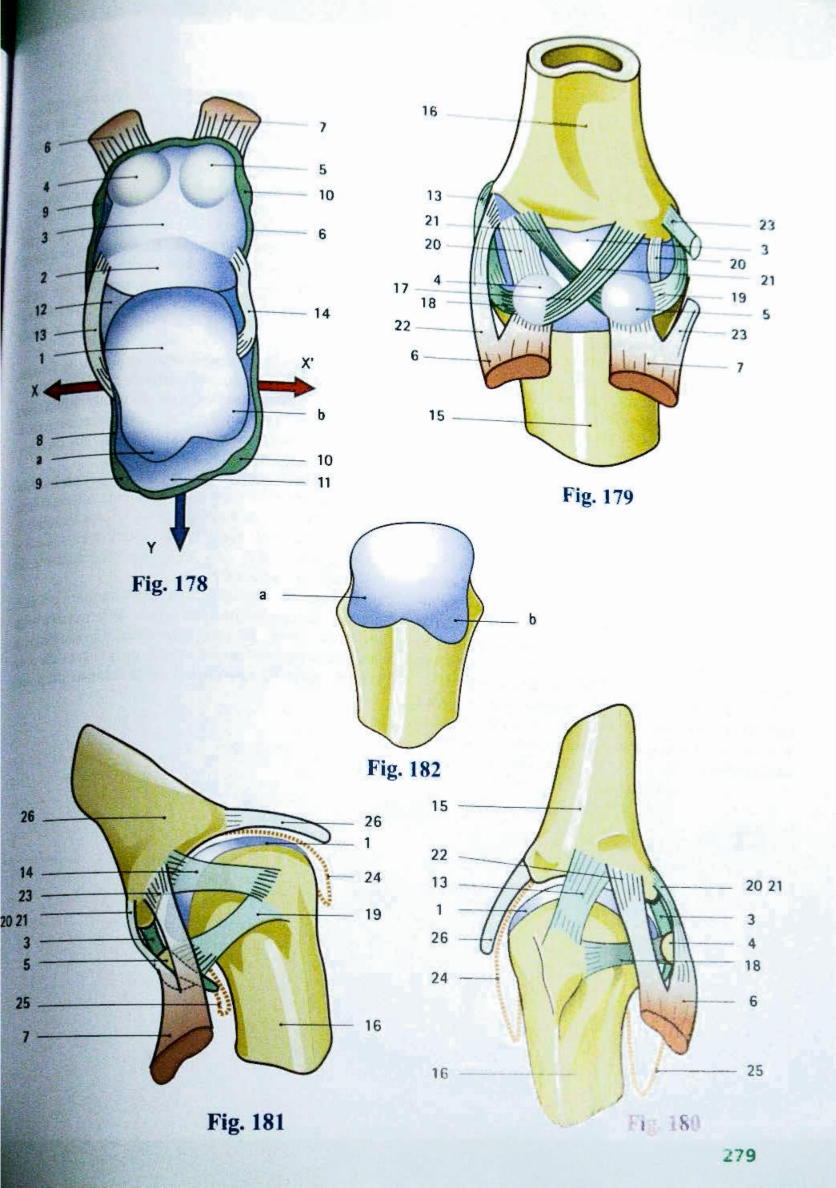


Fig. 178

Fig. 179

Fig. 182

Fig. 181

Fig. 180

Les possibilités d'inclinaison et de rotation longitudinale de la phalange dépendent de son degré de flexion. En **position de rectitude ou d'extension** (Fig. 182) **les ligaments latéraux** 1 sont détendus mais le système de la **plaque palmaire** 2 et des **ligaments métacarpo-glénoïdiens** 3 est tendu, ce qui empêche la rotation longitudinale et la latéralité. C'est la première position de verrouillage, en extension, les sésamoïdes 4 étant fortement appliqués sur les condyles de la tête métacarpienne. À noter que les **deux culs-de-sac synoviaux**, le postérieur 5, et l'antérieur 6, sont relâchés, en position moyenne.

En **position intermédiaire ou de demi-flexion** (Fig. 183) les ligaments latéraux 1 sont encore détendus, l'externe plus que l'interne, et le système de la plaque palmaire 2 est détendu par la bascule des **sésamoïdes** 4 sous les épaulements antérieurs de la tête métacarpienne. C'est la position de **mobilité maximum** où des mouvements de latéralité et de rotation longitudinale sont possibles sous l'action des muscles sésamoïdiens : la contraction des internes déterminant l'inclinaison cubitale et une faible supination, celle des externes une inclinaison radiale et une pronation.

En **position de flexion maximum** ou de verrouillage (Fig. 184) le système de la plaque palmaire est détendu, mais les **ligaments latéraux sont tendus au maximum** ce qui entraîne une bascule de la base phalangienne en **inclinaison radiale et pronation**. L'articulation est littéralement verrouillée par la tension des ligaments latéraux et du cul-de-sac dorsal **5** dans une position univoque d'**opposition maximum** sous l'action prédominante et presque exclusive des muscles **thénariens externes**. C'est la *close-packed position* de Mac Conaill. C'est la deuxième position de verrouillage, en flexion.

Une **vue supérieure** (Fig. 185), la base phalangienne étant supposée transparente, montre l'**effet de rotation en pronation de la phalange** sous l'action prédominante des sésamoïdiens externes SE.

Au total, la métacarpo-phalangienne du pouce peut effectuer **trois types de mouvements** (Kapandji 1980), à partir de la rectitude (Fig. 186) ainsi qu'il est figuré sur cette vue postérieure de la tête métacarpienne avec les axes des différents mouvements :

- La **flexion pure** (flèche 1) autour d'un axe transversal f_1, par l'action équilibrée des muscles sésamoïdiens externes et internes jusqu'à la demi-flexion ;
- Deux types de mouvements complexes de flexion-inclinaison-rotation longitudinale :
  - soit **flexion-inclinaison cubitale-supination** (flèche 2) autour d'un axe oblique, et évolutif, f_2 par rotation conique et sous l'action prédominante des sésamoïdiens internes ;
  - soit **flexion-inclinaison radiale-pronation** (flèche 3) autour d'un axe oblique dans l'autre sens, et lui aussi évolutif, d'obliquité plus marquée f_3. Là encore, il s'agit d'une rotation conique et le mouvement est dû à l'action prédominante des sésamoïdiens externes.

La flexion maximum aboutit donc toujours à l'inclinaison radiale-pronation en raison de la forme asymétrique de la tête métacarpienne et de la tension inégale des ligaments latéraux, ce qui va **dans le sens du mouvement global d'opposition de la colonne du pouce**.

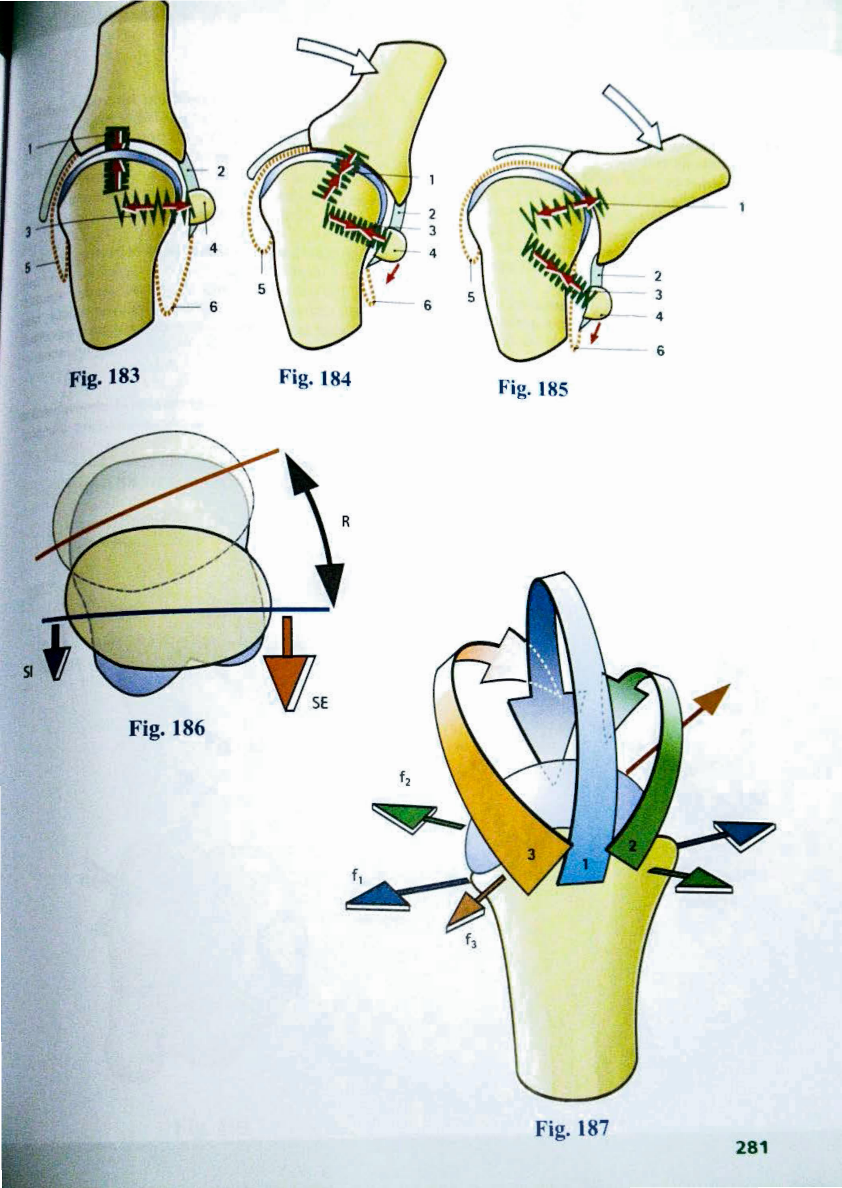


Fig. 183

Fig. 184

Fig. 185

Fig. 186

Fig. 187

Les mouvements dans la métacarpo-phalangienne du pouce

La **position de référence de la métacarpo-phalangienne** du pouce est la **rectitude** (Fig. 187) : l'axe de la première phalange se prolonge dans celui du premier métacarpien. Pour apprécier les mouvements élémentaires des articulations des doigts, il est judicieux de coller un **trièdre rectangulaire de référence**, confectionné avec des allumettes, sur chacun des segments de l'articulation.

À partir de cette position, **l'extension est nulle** qu'elle soit **active ou passive**, sur un sujet **normal**.

La **flexion active** (Fig. 188) est de 60-70°, la flexion passive peut atteindre 80° et même 90°. C'est au cours de ce mouvement qu'il est possible d'apprécier les composantes élémentaires, grâce aux trièdres.

Sur une **vue dorsale en rectitude** (Fig. 189), les trièdres sont collés de façon à ce que les allumettes soient parallèles ou dans le prolongement l'une de l'autre. On peut ainsi mettre particulièrement bien en évidence les composantes de rotation et d'inclinaison.

En **position de demi-flexion**, il est possible de **contracter volontairement** soit les sésamoïdiens internes, soit les externes.

La **contraction des sésamoïdiens internes** : peut être appréciée sur cette vue distale (Fig. 190), le pouce en légère antéposition et sur cette vue proximale (Fig. 191), le pouce est en rétroposition dans le plan de la paume. On voit grâce aux allumettes que la contraction des sésamoïdiens internes entraine une inclinaison cubitale de quelques degrés et une supination de 5 à 7°.

La **contraction des sésamoïdiens externes** : là encore, sur une vue distale (Fig. 192) et sur une vue proximale (Fig. 193) on constate que la contraction des sésamoïdiens externes détermine une inclinaison radiale, bien visible sur la vue proximale, nettement plus importante que l'inclinaison cubitale précédente et une pronation de 20°.

Nous verrons toute l'importance de ce mouvement de flexion-inclinaison radiale-pronation dans l'opposition du pouce.

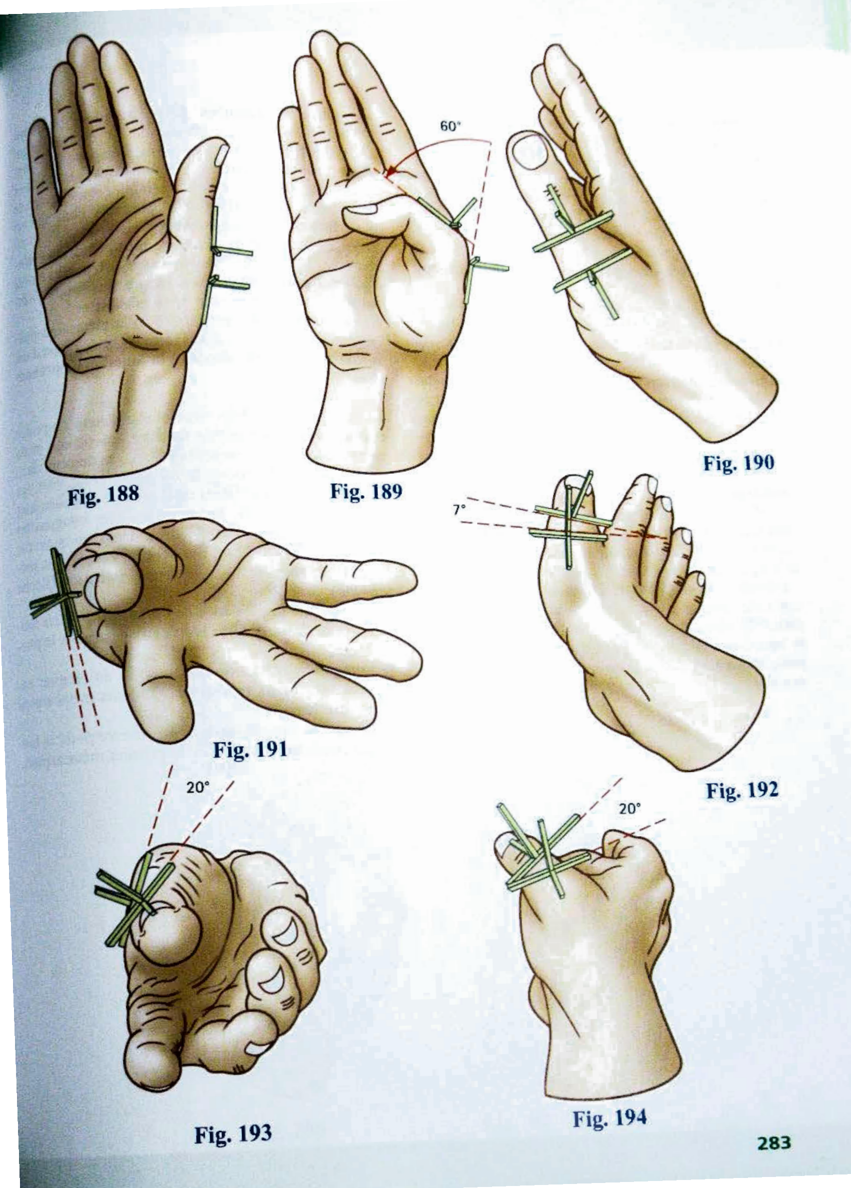


Fig. 188

Fig. 189

Fig. 190

Fig. 191

Fig. 192

Fig. 193

Fig. 194

Les mouvements d'inclinaison-rotation de la métacarpo-phalangienne

Dans les **prises cylindriques à pleine paume**, c'est **l'action des sésamoïdiens externes** sur la métacarpo-phalangienne qui assure le verrouillage de la prise. Lorsque le pouce n'intervient pas (Fig. 194) et reste parallèle à l'axe du cylindre, la prise n'est pas verrouillée et l'objet peut facilement échapper par l'espace laissé libre entre l'extrémité des doigts et l'éminence thénar.

Si, par contre, **le pouce se porte vers les autres doigts** (Fig. 195), le cylindre ne peut plus échapper : l'**inclinaison radiale de la première phalange**, nettement visible grâce aux trièdres de référence, complète le mouvement d'antéposition du premier métacarpien. De la sorte, le pouce parcourt autour du cylindre le chemin le plus court, c'est-à-dire le cercle générateur **f** alors que sans l'inclinaison radiale il suivrait un trajet elliptique plus long **d**.

L'inclinaison radiale est donc indispensable au verrouillage de la prise, d'autant meilleur que l'anneau formé par le pouce et l'index qui enserre l'objet est plus fermé et emprunte sur sa surface le trajet le plus court (Fig. 196) : de la position **a** où le pouce est situé le long d'une génératrice du cylindre et pour laquelle l'anneau de la prise est brisé, en passant par les positions successives **b-c-d-e** pour lesquelles l'anneau se ferme de plus en plus jusqu'à, enfin, la position **f** où le pouce suit le cercle générateur, ce qui ferme complètement l'anneau, la prise est de plus en plus verrouillée.

En outre, la **pronation de la première phalange** (Fig. 197), visible par l'angle de 12° formé par les deux repères transversaux, permet au pouce de s'appliquer sur l'objet par le maximum de sa face palmaire et non par son bord interne. En augmentant la surface de contact, la pronation de la première phalange est donc facteur d'affermissement de la prise.

Lorsque, en raison du **diamètre plus réduit du cylindre** (Fig. 198), le pouce vient à recouvrir partiellement l'index, l'anneau de prise est encore plus étroit, le verrouillage plus absolu et la prise plus ferme.

La physiologie très particulière de la métacarpo-phalangienne du pouce et de ses muscles moteurs est donc **remarquablement adaptée à la fonction de préhension**.

La stabilité de la métacarpo-phalangienne du pouce dépend non seulement de facteurs articulaires, mais encore de **facteurs musculaires**. Normalement, dans le mouvement d'opposition du pouce (Fig. 199), les **deux chaînes articulaires** de l'index et du pouce sont stabilisées par la mise en jeu de muscles antagonistes (figurés par les petites flèches). Dans certains cas (Fig. 200, selon Sterling Bunnel), on peut voir la métacarpo-phalangienne s'inverser en extension (flèche blanche) :

- Lorsqu'une insuffisance de l'*abductor pollicis brevis* et du *flexor pollicis brevis* laisse basculer la phalange ;
- Lorsqu'une rétraction des muscles du premier espace interosseux rapproche le premier métacarpien du deuxième ;
- Lorsqu'une insuffisance de l'*abductor pollicis longus* empêche l'abduction du premier métacarpien.

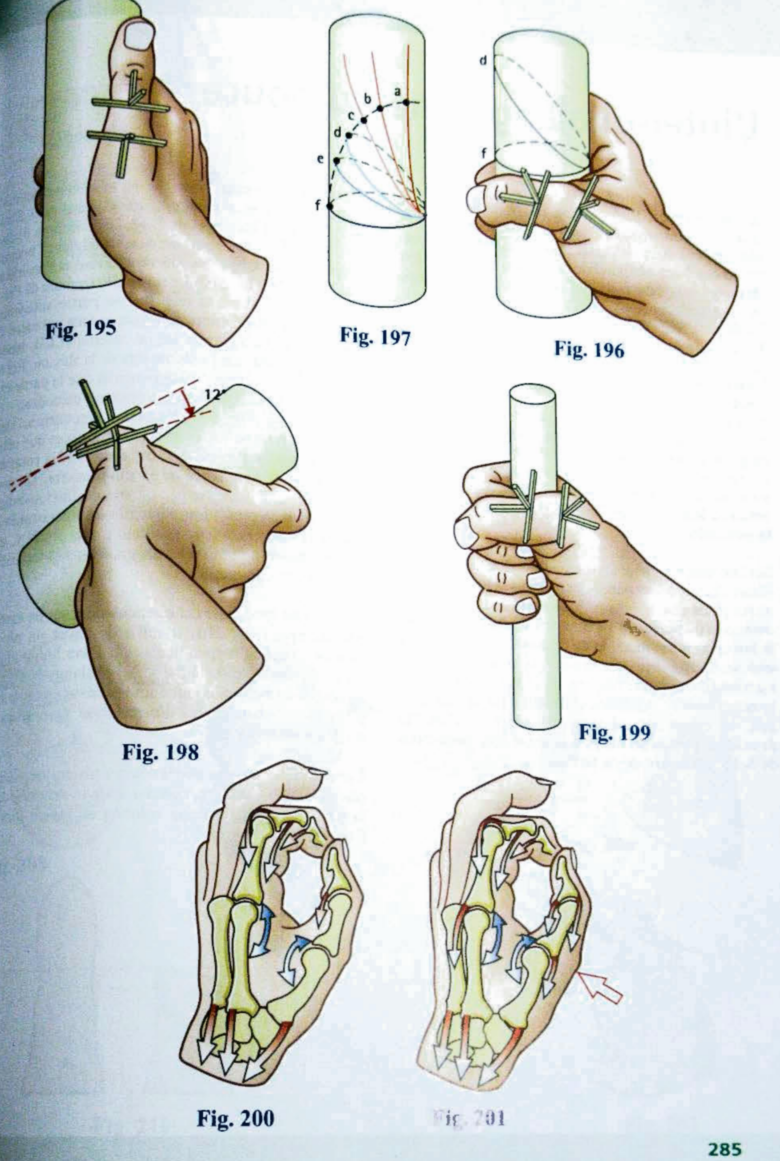


Fig. 195
Fig. 197
Fig. 196
Fig. 198
Fig. 199
Fig. 200
Fig. 201

L'inter-phalangienne du pouce

À première vue, l'articulation inter-phalangienne du pouce est sans mystère : de **type trochléen**, elle possède un seul axe transversal et fixe, passant par le centre de courbure des condyles de la tête de la première phalange, autour duquel s'effectuent des mouvements de flexion-extension.

La **flexion** (Fig. 202) active de 75° à 80°, est mesurable à l'aide d'un goniomètre (Fig. 203) ; passive, elle atteint 90°.

L'**extension** (Fig. 204) active de 5° à 10°, est surtout notable comme hyperextension passive (Fig. 205) qui peut être très prononcée (30°) chez certains professionnels, comme les sculpteurs qui utilisent leur pouce en guise de spatule pour le travail de la glaise.

En fait, la réalité est un peu plus complexe car, à mesure qu'elle fléchit, la deuxième phalange subit une **rotation longitudinale automatique dans le sens de la pronation**.

Sur une préparation anatomique (Fig. 206), après avoir inséré deux broches parallèles, **A** dans la tête de la première phalange, **b** dans la base de la deuxième **b**, en extension complète, la flexion de l'inter-phalangienne **B** fait apparaître un angle de 5° à 10°, ouvert du côté interne, c'est-à-dire dans le sens de la pronation.

La même expérience, réalisée sur le vivant avec les allumettes collées parallèles entre elles sur la face dorsale de **P1** et **P2**, aboutit au même résultat : **la deuxième phalange du pouce subit une pronation de 5-10° au cours de sa flexion**.

L'explication de ce phénomène est fournie par des dispositions purement anatomiques, l'articulation étant ouverte par sa face dorsale (Fig. 207) on note d'emblée les différences entre les deux condyles : l'interne est plus saillant, plus étendu vers l'avant et l'intérieur que l'externe (Fig. 208). Le rayon de courbure de l'externe est plus faible si bien que sa partie antérieure « descend » plus abruptement vers la face palmaire. Il s'ensuit que le ligament latéral interne (LLI), tendu plus rapidement que l'externe lors de la flexion, freine la partie interne de la phalange tandis que la partie externe de la base phalangienne poursuit sa course.

Autrement dit (Fig. 209), le chemin parcouru **AA'** sur le condyle interne est légèrement plus court que celui parcouru sur l'externe **BB'**, ce qui entraîne la **rotation longitudinale combinée de la phalangette**. On peut donc dire qu'il n'existe pas un axe de flexion-extension mais bien plutôt **une série d'axes instantanés et évolutifs** entre la position initiale **i** et la finale **f**, qui convergent en un point **O** situé en dehors et induisent une rotation conique.

Si l'on veut modéliser cette articulation, sur un carton par exemple (Fig. 210) il suffit de tracer un pli de flexion, non pas perpendiculaire à l'axe longitudinal du doigt, mais incliné à 5-10° : la phalangette décrira sa course en flexion comme une rotation conique impliquant un changement d'orientation proportionnel au degré de flexion.

Cette composante de pronation au niveau de l'inter-phalangienne s'intègre, comme nous le verrons, dans la pronation globale de la colonne du pouce lors de l'opposition.

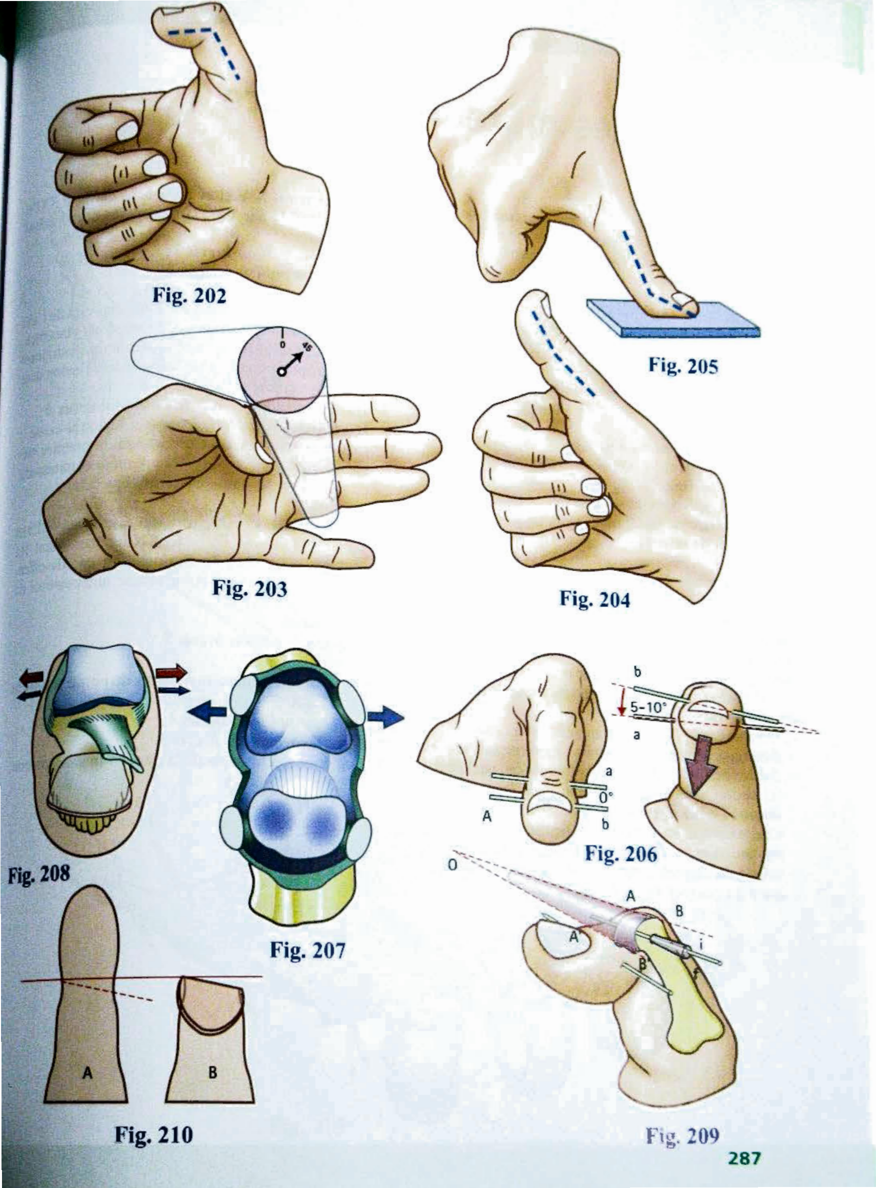


Fig. 202

Fig. 205

Fig. 203

Fig. 204

Fig. 208

Fig. 207

Fig. 206

Fig. 210

Fig. 209

Les muscles moteurs du pouce

Le pouce possède **neuf muscles moteurs** : cette richesse musculaire, qui dépasse nettement celle des autres doigts, conditionne la **mobilité supérieure et la fonction essentielle** de ce doigt.
Ces muscles se répartissent en deux groupes :

1) Les **muscles extrinsèques**, ou muscles longs, au nombre de **quatre**, logés dans l'avant-bras. **Trois sont extenseurs et abducteurs** et utilisés pour relâcher la prise, **le dernier est fléchisseur** et sa puissance est utilisée pour le verrouillage des prises de force.
2) Les **muscles intrinsèques**, contenus dans l'éminence thénar et le premier espace interosseux, au nombre de **cinq**. Ils servent à la réalisation des différentes prises et en particulier de l'**opposition**. Leur puissance est limitée, mais ce sont plutôt des **moteurs de précision et de coordination**.

Pour comprendre l'action des moteurs sur l'ensemble de la colonne du pouce, il faut **situer leur trajet par rapport aux deux axes théoriques de la trapézo-métacarpienne** (Fig. 212) : l'axe **YY'** de flexion-extension, parallèle aux axes f_1 et f_2 de flexion de la métacarpo-phalangienne et de l'inter-phalangienne, et l'axe **XX'** d'anté et rétro-position délimitent entre eux **quatre quadrants** :

1) Un **quadrant X'Y'** situé en arrière de l'axe **YY'** de flexion-extension de la trapézo-métacarpienne et en dehors de l'axe XX' d'anté-rétropulsion, occupé par le tendon d'un seul muscle, le l'***abductor pollicis longus*** 1 situé à proximité immédiate de l'axe **XX'**. Ceci explique sa composante peu importante d'antéposition et sa forte action d'extension sur le premier métacarpien (Fig. 211 : vue externe et proximale du poignet vu en fuite) ;

2) Un **quadrant X'Y** situé en dedans de l'axe XX' et en arrière de l'axe YY', contenant les deux tendons extenseurs :
- ***L'extensor pollicis brevis*** 2 ;
- ***L'extensor pollicis longus*** 3.

3) Un **quadrant XY** (Fig. 213) situé en avant de l'axe YY' et en avant de l'axe XX', occupé par deux muscles situés dans le premier espace et qui entraînent une rétroposition associée à une légère flexion dans la trapézo-métacarpienne :
- ***L'adductor pollicis*** avec ses deux faisceaux 8 ;
- ***L'interosseus palmaris primus*** 9 lorsqu'il existe.
- Ces deux muscles sont adducteurs du premier métacarpien : ils « ferment » la première commissure, en le rapprochant du deuxième (Fig. 211) ;

4) Un **quadrant XY'** (Fig. 213) situé en avant de l'axe YY' et en dehors de l'axe XX' et 'contenant les **muscles essentiels de l'opposition** car ils effectuent à la fois une flexion et une antéposition du premier métacarpien :
- ***L'opponens*** 6 ;
- ***L'abductor pollicis brevis*** 7.

Les deux derniers muscles moteurs du pouce se situent **sur l'axe XX'** :
- Le ***flexor pollicis longus*** 4 ;
- Et le ***flexor pollicis brevis*** 5.

Ils sont donc fléchisseurs de la trapézo-métacarpienne.

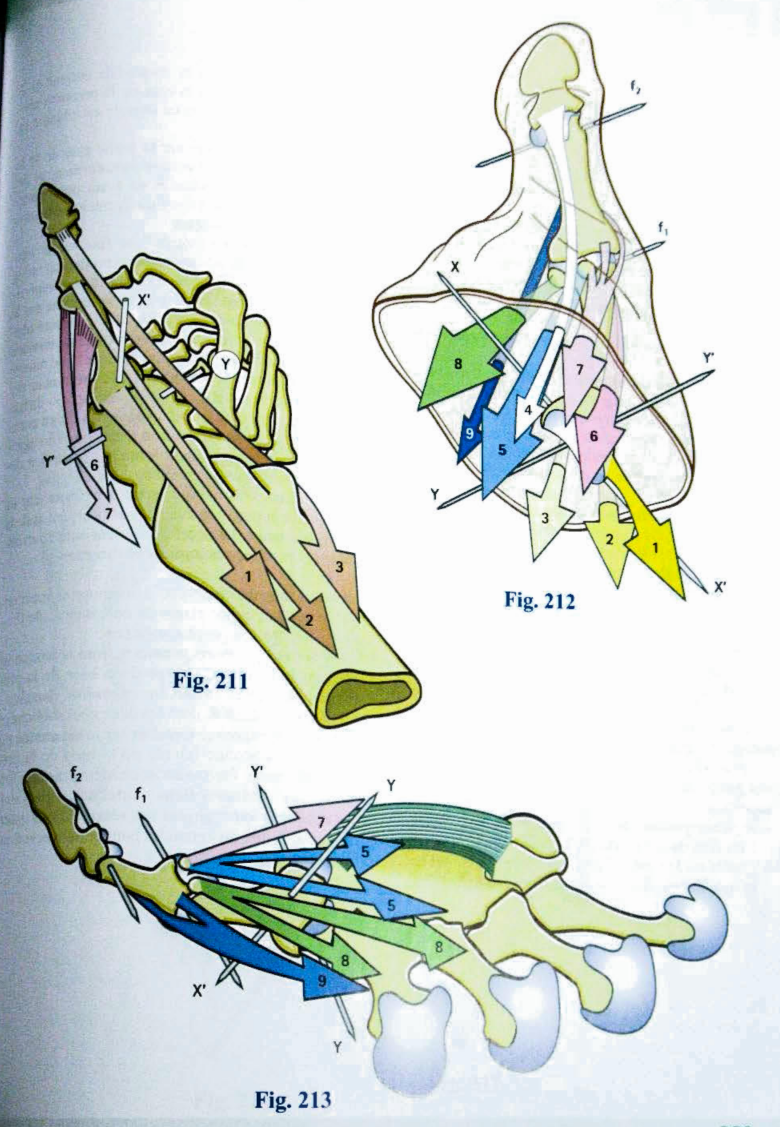


Fig. 211

Fig. 212

Fig. 213

Un court **rappel d'anatomie** éclaire la physiologie des muscles moteurs du pouce, décrits en deux groupes :

1) Les **muscles extrinsèques** :

- L'***abductor pollicis longus*** **1** (Fig. 214 : vue antérieure) se fixe sur la partie antéro-externe de la base du premier métacarpien ;
- L'***extensor pollicis brevis*** **2**, parallèle au précédent (Fig. 215 : vue externe), s'insère sur la partie dorsale de la base de la première phalange ;
- L'***extensor pollicis longus*** **3** se termine sur la partie dorsale de la base de la deuxième phalange.

Deux remarques s'imposent à propos de ces trois muscles :

- **Sur le plan anatomique** : ces trois tendons, visibles sur la face dorsale et externe du pouce, limitent entre eux un espace triangulaire à sommet inférieur, la **tabatière anatomique**, dans le fond de laquelle glissent les tendons parallèles l'***extensor carpi radialis longus*** **10** et de l'***extensor carpi radialis brevis*** **11** ;
- **Sur le plan fonctionnel** : chacun d'eux est moteur d'un segment du squelette du pouce et tous trois dans le sens de l'extension ;
- Par contre, le ***flexor pollicis longus*** **4** est palmaire : il chemine d'abord dans le canal carpien, puis s'insinue entre les deux faisceaux musculaires du *flexor pollicis brevis*, puis glisse entre les deux os sésamoïdes de la métacarpo-phalangienne du pouce (Fig. 214) pour se fixer sur la face palmaire de la base de la deuxième phalange.

2) Les **muscles intrinsèques** (Fig. 214 et 215). Ils se répartissent en deux groupes :

- Le **groupe externe** comprend trois muscles, innervés par le médian, qui sont, de la profondeur à la superficie :
  - le ***flexor pollicis brevis*** **5** formé de deux chefs, l'un fixé dans le fond de la gouttière carpienne, l'autre sur le bord inférieur du ligament annulaire et le tubercule du trapèze ; ils se terminent par un tendon commun sur le sésamoïde externe et le tubercule externe de la base de la première phalange ; la direction de ce muscle est oblique en haut et en dedans ;
  - l'***opponens*** **6** s'insère sur la partie externe de la face *antérieure du premier métacarpien*, se dirige en haut, en dedans et en avant pour s'attacher sur la *face antérieure du ligament annulaire*, dans sa moitié externe ;
  - l'***abductor pollicis brevis*** **7** se fixe sur le ligament annulaire, au-dessus du précédent et sur le tubercule du scaphoïde, formant le plan superficiel des muscles thénariens, et se termine sur le tubercule externe de la base de la première phalange ; une expansion dorsale forme une dossière avec l'***interosseus palmaris primus*** **9**, ce muscle n'est pas situé en dehors, mais en avant et en dedans du premier métacarpien, et se dirige, comme l'opposant, en haut en dedans et en avant. Contrairement à ce que son nom pourrait suggérer, il n'écarte pas la colonne du pouce en dehors, mais la porte en avant et en dedans.

  Ces trois muscles forment le **groupe externe**, car ils s'insèrent sur la partie externe du métacarpien et de la première phalange. Le court fléchisseur et le court abducteur forment les **sésamoïdiens externes**.

- Le **groupe interne** comprend deux muscles innervés par le cubital, qui se fixent du côté interne de l'articulation métacarpo-phalangienne :
  - l'***interosseus palmaris primus*** **9**, dont le tendon se fixe sur le tubercule interne de la base de la première phalange et envoie une expansion dorsale ;
  - l'***adductor pollicis*** **8**, dont les deux chefs oblique et transverse viennent se terminer sur le sésamoïde interne et le tubercule interne de la base de la première phalange. Par symétrie, ces deux muscles forment les **sésamoïdiens internes**. Ils sont **antagonistes-synergiques** des sésamoïdiens externes, c'est-à-dire antagonistes pour certaines actions et synergiques pour d'autres.

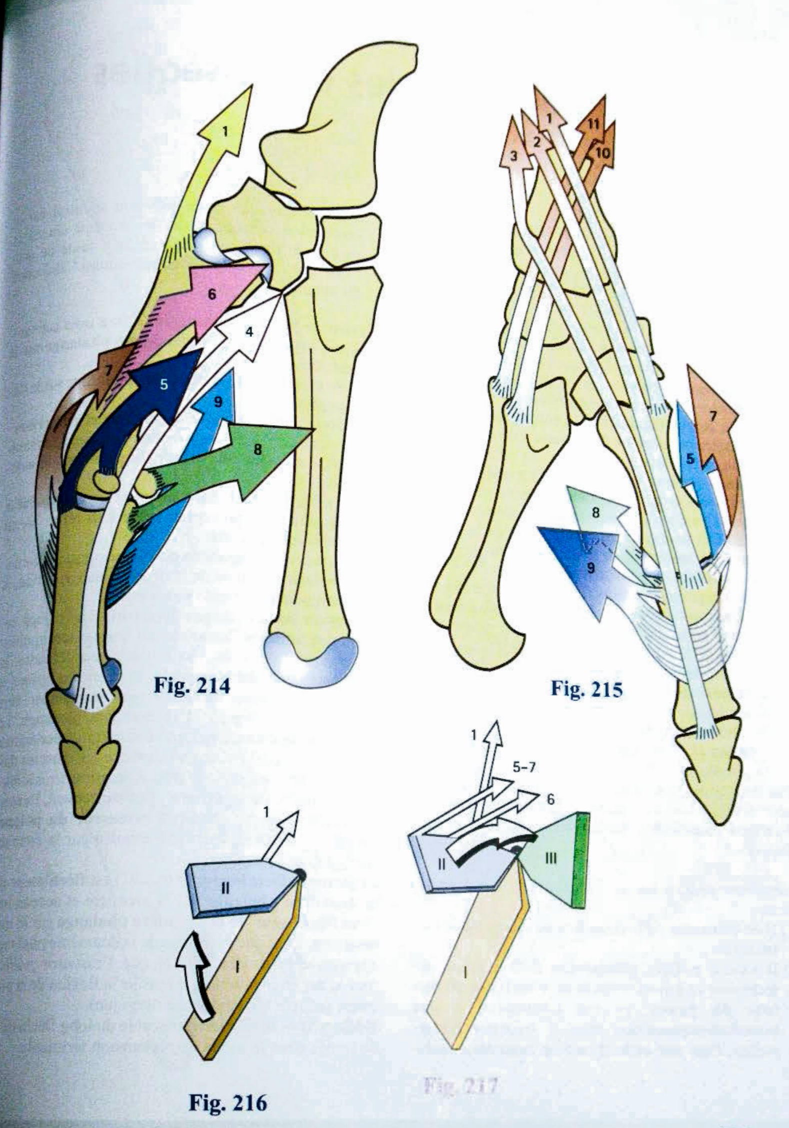

1
6
4
7
5
9
8
Fig. 214
1
11
2
10
3
7
5
8
9
Fig. 215
1
5–7
6
II
III
I
1
II
I
Fig. 216

Fig. 217

Les actions des muscles extrinsèques du pouce

L'***abductor pollicis longus*** (Fig. 218) porte le premier métacarpien en dehors et en avant. Il est donc **abducteur et antépulseur** du métacarpien, surtout lorsque le poignet est légèrement fléchi. Cette antépulsion résulte de sa situation plus antérieure dans la tabatière anatomique (Fig. 215). Lorsque le poignet n'est pas stabilisé par les *extensor radialis* – le *brevis* surtout – l'*abductor pollicis longus* est aussi **fléchisseur du poignet**. Lorsque le poignet est en extension, il devient rétropulseur du premier métacarpien.

Du point de vue fonctionnel, le **couple *abductor pollicis longus* et muscles du groupe externe** joue un rôle primordial dans l'opposition. En effet, pour que le pouce se porte en opposition, il faut que le premier métacarpien s'érige perpendiculairement en avant du plan de la paume ; l'éminence thénar forme alors un cône saillant au-dessus du bord externe de la paume. Cette action résulte de la mise en jeu de ce couple fonctionnel (Fig. âge précédente) :

- Dans un **premier temps** (Fig. 216 : le premier métacarpien est stylisé) l'***abductor pollicis longus*** **1** porte le métacarpien en extension, en avant et en dehors, de la position **I** à la position **II** ;
- Dans un **deuxième temps** (Fig. 217) : à partir de cette position **II**, les muscles du groupe externe : *flexor brevis, abductor brevis* **5** et **7** et *opponens* **6** font basculer le métacarpien en avant et en dedans (position **III**), tout en le faisant tourner sur son axe longitudinal.

Les deux temps ont été décrits comme successifs, mais en réalité, ils sont simultanés et la position finale **III** du métacarpien résulte de l'action synchrone des deux facteurs.

L'***extensor pollicis brevis*** (Fig. 219) possède deux actions :

1) Il est **extenseur de la première phalange** sur le métacarpien ;
2) Il porte le premier métacarpien, donc le pouce, directement en dehors : c'est donc le **véritable abducteur du pouce**, ce qui correspond à une extension/rétroposition dans la trapézo-métacarpienne. Pour que cette abduction apparaisse isolément, il faut que le poignet soit stabilisé par la contraction synergique du *flexor carpi ulnaris* et surtout de l'*extensor carpi ulnaris*, faute de quoi l'*extensor pollicis brevis* entraîne aussi l'abduction du poignet.

L'***extensor pollicis longus*** (Fig. 220) a trois actions :

1) Il est **extenseur de la deuxième phalange** sur la première ;
2) Il est **extenseur de la première phalange** sur le métacarpien ;
3) Il porte le **métacarpien en dedans et en arrière** :
   - En dedans : il « ferme » le premier espace interosseux, il est donc **adducteur du premier métacarpien** ;
   - En arrière du plan de la main : il est **rétropulseur du premier métacarpien** grâce à sa réflexion sur le tubercule de Lister (Fig. 206).

Donc c'est un antagoniste de l'opposition : il contribue à aplanir la paume de la main ; sous son action, la pulpe du pouce s'oriente vers l'avant.

L'***extensor pollicis longus*** forme avec le groupe externe des muscles thénariens un couple antagoniste-synergique : en effet, lorsqu'on veut étendre la deuxième phalange sans porter le pouce en arrière, il faut que le groupe thénarien externe stabilise vers l'avant le métacarpien et la première phalange. Le groupe thénarien externe agit donc comme modérateur de l'*extensor pollicis longus* : lorsque les muscles thénariens sont paralysés, le pouce se porte irrésistiblement en dedans et en arrière. Accessoirement, l'*extensor pollicis longus* est **aussi extenseur du poignet** lorsque cette action n'est pas annulée par la contraction du grand palmaire.

Le ***flexor pollicis longus*** (Fig. 221) est **fléchisseur de la deuxième phalange** sur la première et accessoirement **fléchisseur de la première phalange** sur le métacarpien. Pour que la flexion de la deuxième phalange apparaisse isolément, il faut que l'*extensor pollicis brevis*, par sa contraction, empêche la flexion de la première (couple antagoniste-synergique).

Nous verrons le rôle irremplaçable du long fléchisseur du pouce dans le mode de préhension terminale.

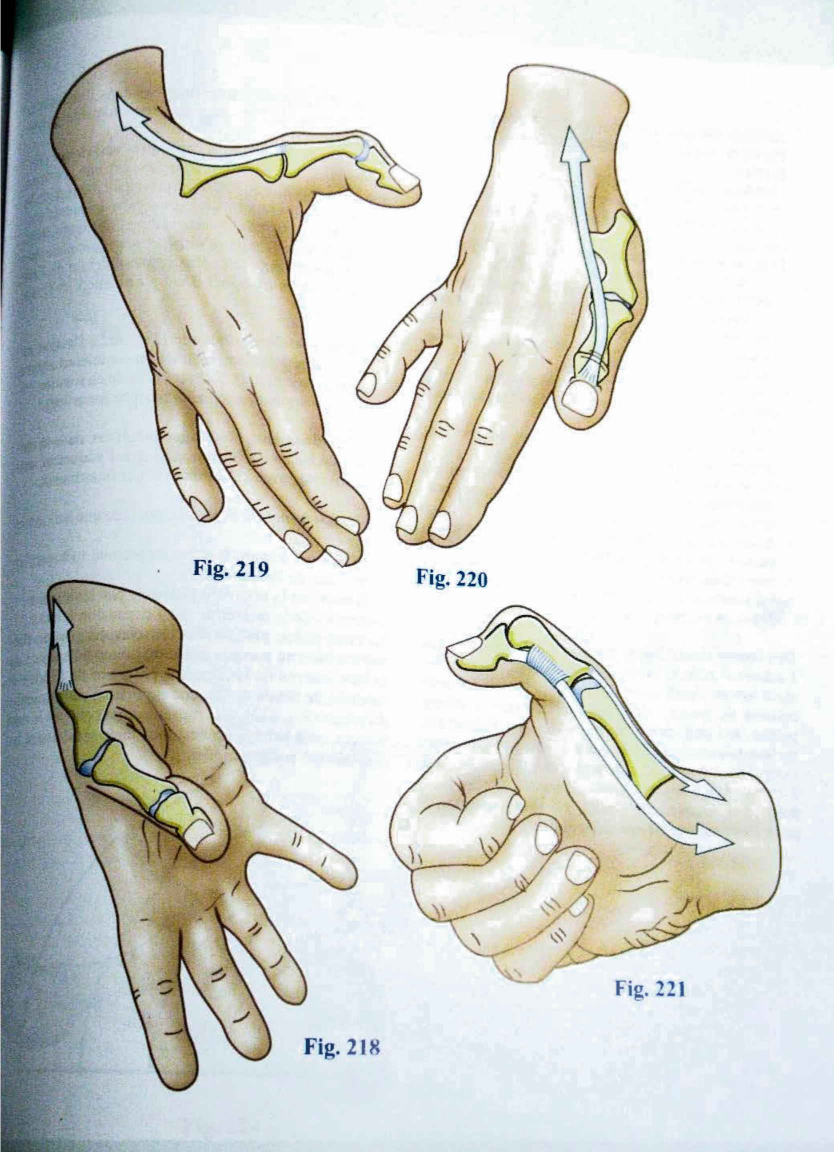


Fig. 219

Fig. 220

Fig. 218

Fig. 221

Actions du groupe interne des muscles thénariens, ou encore muscles sésamoïdiens internes

L'*adductor pollicis* **8** (Fig. 222), avec ses deux chefs, chef oblique (flèche blanche supérieure) et chef transverse (flèche blanche inférieure), agit sur les trois pièces osseuses du pouce :

1) Sur le **premier métacarpien** (Fig. 223 : diagramme en coupe), la contraction de l'*adductor pollicis* porte le métacarpien dans une position d'équilibre **A** légèrement en dehors et en avant du deuxième métacarpien, si bien que, selon Duchenne de Boulogne, le sens du mouvement dépend de la position de départ du métacarpien :

- L'*adductor pollicis* est effectivement adducteur si le métacarpien part de la position d'abduction maximum **I** ;
- Mais il devient abducteur si le métacarpien est, au départ, en adduction maximum **2** ;
- Si le métacarpien est, au départ, en rétroposition maximum, sous l'influence du long extenseur propre **3**, l'adducteur devient antépulseur ;
- Il devient, au contraire rétropulseur si le métacarpien est porté au préalable en antéposition par le court abducteur **4** ;
- La position de repos du premier métacarpien est moyenne **R**, entre **1** et **3**.

Des **études électromyographiques** ont démontré que l'*adductor pollicis* intervient activement non seulement lors de l'adduction, mais encore lors de la rétropulsion du pouce, lors de la préhension à pleine paume, lors de la prise sub-terminale, dite pulpaire et surtout subtermino-latérale, dite pulpo-latérale. Dans l'opposition du pouce aux autres doigts, il intervient d'autant plus activement que le pouce s'oppose à un doigt plus interne. Son action est **donc maximum pour l'opposition pouce-auriculaire**.

L'*adductor pollicis* n'intervient pas dans l'abduction, l'antépulsion, la prise termino-terminale dite pulpo-unguéale.

Des **travaux électromyographiques ultérieurs** (Hamonet, De La Caffinière et Opsomer) ont confirmé que son activité se manifeste principalement dans le mouvement qui rapproche le pouce du deuxième métacarpien et cela dans tous les secteurs de l'opposition. Son activité est moindre dans la grande course que dans la petite (Fig. 224 : diagramme d'action de l'adducteur d'après Hamonet, De La Caffinière et Opsomer).

2) Sur **la première phalange** (Fig. 222), l'action est triple : légère flexion, inclinaison sur le bord interne (bord ulnaire), rotation longitudinale en rotation externe ou supination (flèche blanche incurvée) ;

3) Sur **la deuxième phalange** : extension, dans la mesure où les insertions terminales de l'adducteur sont communes avec celles du premier interosseux.

L'***interosseus palmaris primus*** possède une action très voisine :

- Adduction (rapprochement du premier métacarpien de l'axe de la main) ;
- Flexion de la première phalange par la dossière ;

Extension de la deuxième par l'expansion latérale.

La **contraction globale des muscles du groupe thénarien interne** porte la pulpe du pouce au contact de la face externe de la première phalange de l'index et entraîne, en même temps, une supination de la colonne du pouce (Fig. 222). Ces muscles, innervés par le nerf ulnaire, sont indispensables pour tenir solidement les objets entre pouce et index.

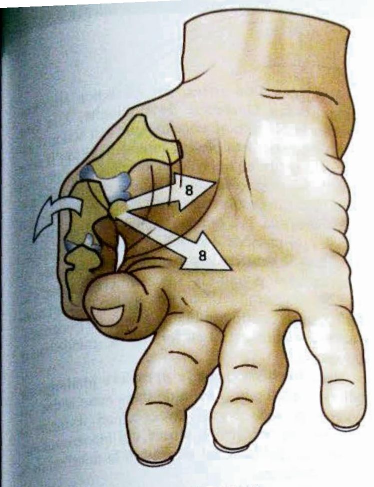


Fig. 222

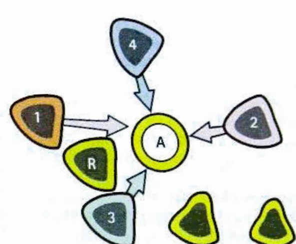




Fig. 223

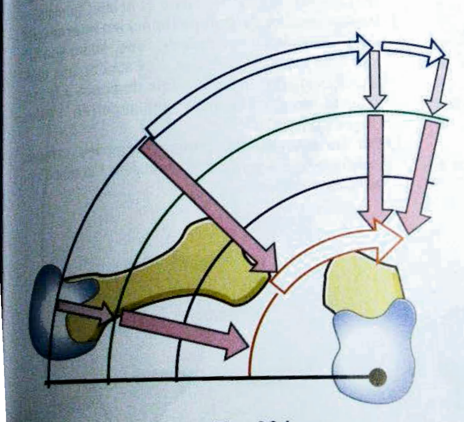


Fig. 224

Actions du groupe externe des muscles thénariens

L'*opponens* 6 possède trois actions, symétriques à celle de l'*opponens quinti*; le **diagramme électromyographique** (Fig. 226 : même source) en précise les secteurs :

- **Antépulsion du premier métacarpien** sur le carpe, surtout dans la grande course ;
- **Adduction**, rapprochant le premier du deuxième métacarpien dans les positions extrêmes ;
- **Rotation longitudinale** dans le sens de la pronation.

Ces trois actions simultanées étant nécessaires à l'opposition, ce muscle mérite son nom (Fig. 225).

L'*opponens* intervient donc activement dans tous les genres de prise nécessitant la mise en jeu du pouce. En outre l'électromyographie a démontré sa mise en jeu paradoxale dans l'abduction, au cours de laquelle il jouerait un rôle stabilisateur sur la colonne du pouce.

L'***abductor pollicis brevis*** 7 et 7' écarte le premier métacarpien du deuxième en fin d'opposition (Fig. 227 : diagramme électromyographique - même source) :

- Il porte **le premier métacarpien en avant et en dedans** lors de la grande course d'opposition, c'est-à-dire lorsqu'il est écarté au maximum du deuxième (Fig. 225);
- Il **fléchit la première phalange** sur le métacarpien tout en lui imprimant un mouvement **d'inclinaison radiale** (sur le bord externe) et ;
- Une rotation longitudinale dans le sens de la **pronation** (rotation interne) ;
- Enfin, il **étend la deuxième phalange** sur la première par son expansion au long extenseur.

Lorsqu'il se contracte seul par excitation électrique, l'*abductor pollicis brevis* porte la pulpe du pouce en opposition avec l'index et le médius (Fig. 225). C'est donc un muscle essentiel de l'opposition. Nous avons vu qu'il forme, avec l'*abductor pollicis longus*, un couple fonctionnel indispensable à l'opposition.

Le ***flexor pollicis brevis*** 5 et 5' (Fig. 228) participe à l'action générale des muscles du groupe externe.

Toutefois, lorsqu'on arrive, par excitation électrique comme l'a fait Duchenne de Boulogne, à le faire contracter isolément, on constate que son action d'**adduction** est nettement plus prononcée, puisqu'il porte la pulpe du pouce en opposition avec les deux derniers doigts. Par contre, son action d'antépulsion du premier métacarpien (projection en avant) est moins ample, car son chef profond 7' s'oppose sur ce point au chef superficiel 7. Il possède une action de rotation longitudinale, dans le sens de la pronation, très marquée.

Le recueil des potentiels sur son chef superficiel (Fig. 229 : diagramme d'après la même source) montre qu'il a une activité semblable à celle de l'opposant ; son action maximum a lieu lors de la, grande course d'opposition.

Il est aussi **fléchisseur de la première phalange** sur le métacarpien, mais il est aidé dans cette action par l'*abductor pollicis brevis*, avec lequel il forme le groupe des sésamoïdiens externes, et l'*interosseus palmaris primus* qui forment ensemble la dossière de la première phalange.

La **contraction globale des muscles du groupe thénarien externe**, aidée par celle de l'*abductor pollicis longus*, **produit l'opposition du pouce**.

L'**extension de la deuxième phalange** peut être effectuée, comme l'a montré Duchenne de Boulogne, par **trois muscles ou groupes musculaires** qui interviennent dans des circonstances différentes :

1) **Par l'*extensor pollicis longus*** : elle est alors combinée avec une extension de la première phalange et un effacement de l'éminence thénar. Ces actions sont utilisées lorsqu'on ouvre et aplanit la main ;
2) **Par les muscles du groupe thénarien interne** (premier interosseux palmaire) : une adduction du pouce lui est alors associée. Ces actions sont utilisées lorsqu'on oppose la pulpe du pouce à la face externe de la première phalange de l'index (Fig. 244);
3) **Par les muscles du groupe thénarien externe**, l'*abductor pollicis brevis* surtout dans l'action d'opposition pulpaire.

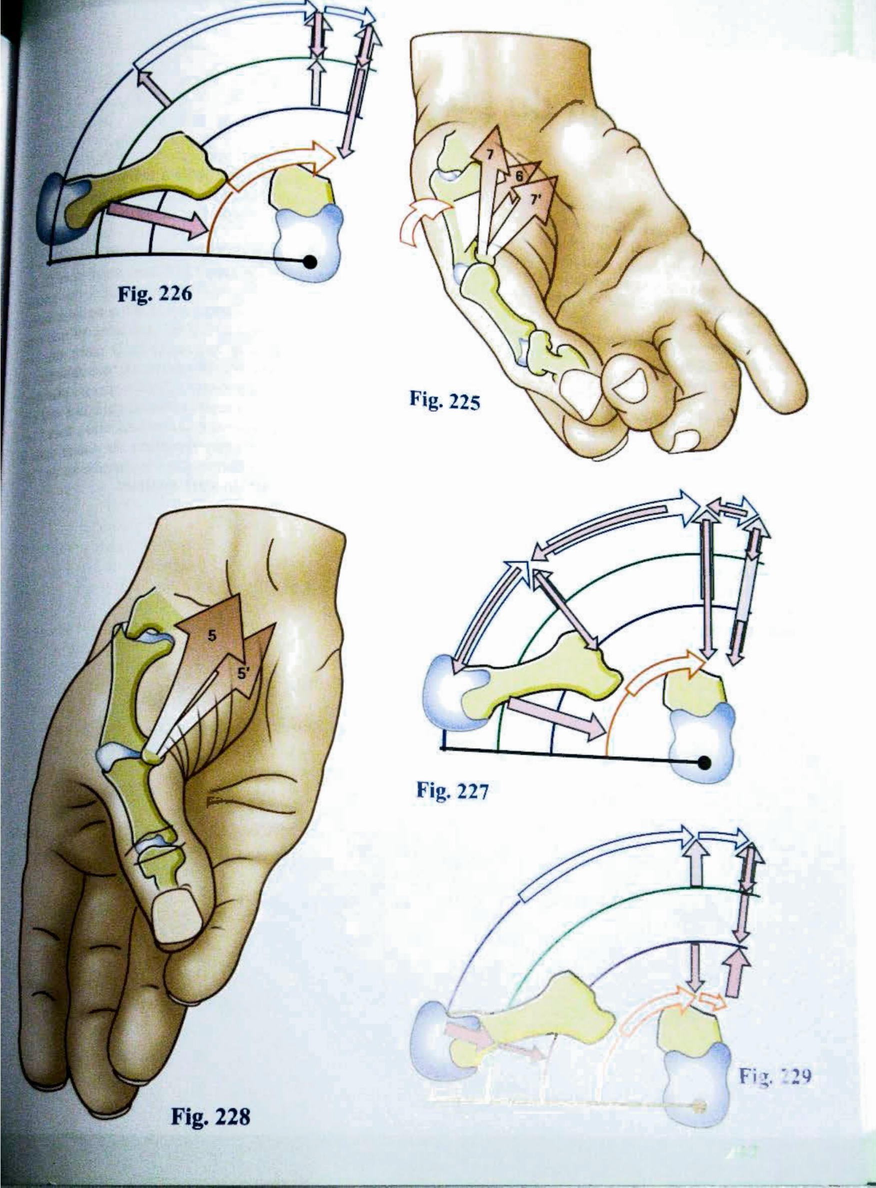


Fig. 226

Fig. 225

Fig. 228

Fig. 227

Fig. 229

L'opposition du pouce

L'**opposition est le mouvement essentiel du pouce** : c'est la faculté de porter sa pulpe au contact de la pulpe de l'un des quatre autres doigts pour constituer une **pince pollicidigitale**. Il n'y a donc pas une opposition, mais toute une gamme d'oppositions qui réalisent une **grande variété de prises et d'actions** suivant le nombre des doigts concernés et leur modalité d'association. Le pouce ne prend toute sa signification fonctionnelle que par rapport aux autres doigts et vice versa. Mais **sans le pouce, la main perd la quasi totalité de sa valeur fonctionnelle** au point que des interventions chirurgicales complexes se donnent pour but de le reconstituer en partant des éléments restants : ce sont les **opérations de pollicisation d'un doigt,** et maintenant de **transplantation**.

Toutes les variétés d'opposition sont contenues à l'intérieur d'un **secteur conique d'espace** dont le sommet est occupé par la trapézo-métacarpienne, ou **cône d'opposition**. Ce cône est, à vrai dire, très déformé car sa base est limitée, comme l'ont défini J. Duparc et J-Y de la Caffinière, par « **la grande et la petite courses d'opposition** ».

La **grande course** (Fig. 229) a été parfaitement décrite par Sterling Bunnel lors de son expérience classique « des allumettes » (Fig. 233).

La **petite course** (Fig. 230), définie comme suit : « le premier métacarpien accomplit dans un plan et de façon pratiquement linéaire un mouvement qui amène progressivement sa tête en avant du deuxième métacarpien ». Ce mouvement n'est en réalité qu'une **reptation du pouce dans la paume** de la main, très peu utilisée et très peu fonctionnelle, ne méritant pas le nom d'opposition car elle ne s'accompagne pratiquement pas de cette **composante de rotation** qui est, comme nous allons le voir, si fondamentale dans l'opposition. D'ailleurs, cette reptation du pouce dans la paume s'observe justement dans les paralysies de l'opposition par **déficit du nerf médian**.

Fig. 230

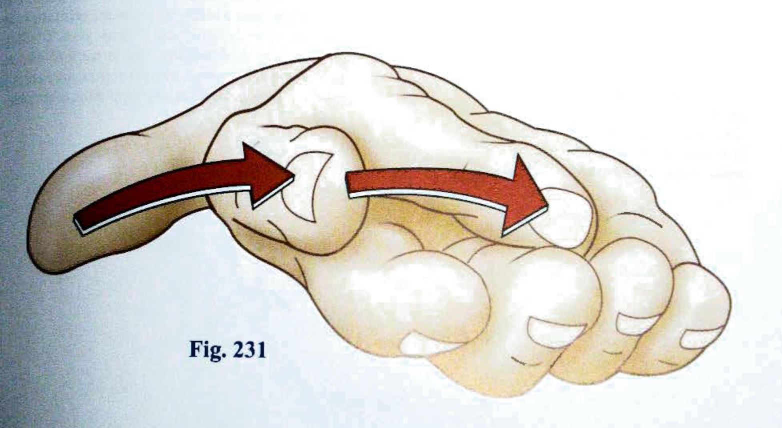


Fig. 231

Mécaniquement, l'opposition du pouce est un **mouvement complexe** qui associe, à des degrés divers, trois composantes : l'**antéposition**, la **flexion** et la **pronation** de la colonne ostéo-articulaire du pouce.

- L'**antéposition** ou projection **A** (Fig. 232) est le mouvement qui porte le pouce **en avant du plan de la paume**, l'éminence thénar formant alors un cône dressé à l'angle supéro-externe de la main. Il s'effectue essentiellement **au niveau de la trapézo-métacarpienne**, accessoirement dans la métacarpo-phalangienne où l'inclinaison radiale accentue l'érection de la colonne du pouce. Cet écartement du premier métacarpien par rapport au deuxième est appelé abduction par les auteurs anglophones, ce qui est contradictoire avec la deuxième composante d'adduction portant le pouce en dedans. Tant qu'à employer le terme d'abduction, il vaut mieux le réserver pour l'écartement du premier métacarpien du deuxième dans le plan frontal ;
- La **flexion F** (Fig. 233) porte toute la colonne en dedans, c'est pourquoi, dans la terminologie classique, on la nomme adduction. Mais nous avons vu qu'il s'agit, en fait, de la flexion de toutes les articulations de la colonne du pouce :
  - la **trapézo-métacarpienne**, essentiellement, mais elle ne peut porter le premier métacarpien plus loin que le plan sagittal passant par l'axe longitudinal du deuxième. C'est bien un mouvement de flexion car il se prolonge dans la flexion de la deuxième articulation ;
  - la **métacarpo-phalangienne**, en effet, vient ajouter sa flexion à des degrés divers suivant le doigt « visé » par le pouce dans son mouvement d'opposition ;
  - l'**inter-phalangienne** enfin fléchit pour apporter la « touche finale » prolongeant l'action de la métacarpo-phalangienne pour atteindre l'objectif.
- La **pronation**, composante essentielle de l'opposition du pouce, grâce à laquelle les pulpes peuvent s'appliquer l'une contre l'autre, peut se définir comme le changement d'attitude de la dernière phalange du pouce qui « regarde » dans des directions différentes suivant son degré de rotation sur son axe longitudinal. Le mot pronation est pris par analogie avec le mouvement de l'avant-bras et s'effectue dans le même sens. Cette rotation de la dernière phalange sur son axe longitudinal est le **résultat de l'activité de la colonne du pouce dans son ensemble** où toutes les articulations sont concernées à des degrés et par des mécanismes divers. L'**expérience « des allumettes » de Sterling Bunnel** (Fig. 234) la met bien en évidence : après avoir collé une allumette transversalement sur la base de l'ongle du pouce, et regardant la main « de bout » (on peut faire cette expérience sur soi-même en se regardant dans une glace), on mesure un angle de 90 à 120° entre sa position initiale **I**, main plate, et sa position finale **II**, position d'opposition maximum, pouce contre auriculaire. On a d'abord cru que cette rotation de la colonne du pouce sur son axe longitudinal s'effectuait grâce à la laxité de la capsule au niveau de la trapézo-métacarpienne. Or, les travaux récents ont montré que c'est dans l'opposition que l'articulation est la plus « serrée » (*close-packed position*) et que le jeu mécanique est le plus faible. On sait maintenant que si l'essentiel de la rotation provient bien de la trapézo-métacarpienne, c'est **grâce à un tout autre mécanisme, celui du « cardan »** de cette articulation à deux axes. D'ailleurs une **prothèse à deux axes** de la trapézo-métacarpienne réalisée suivant ces principes joue parfaitement son rôle et permet une opposition normale.

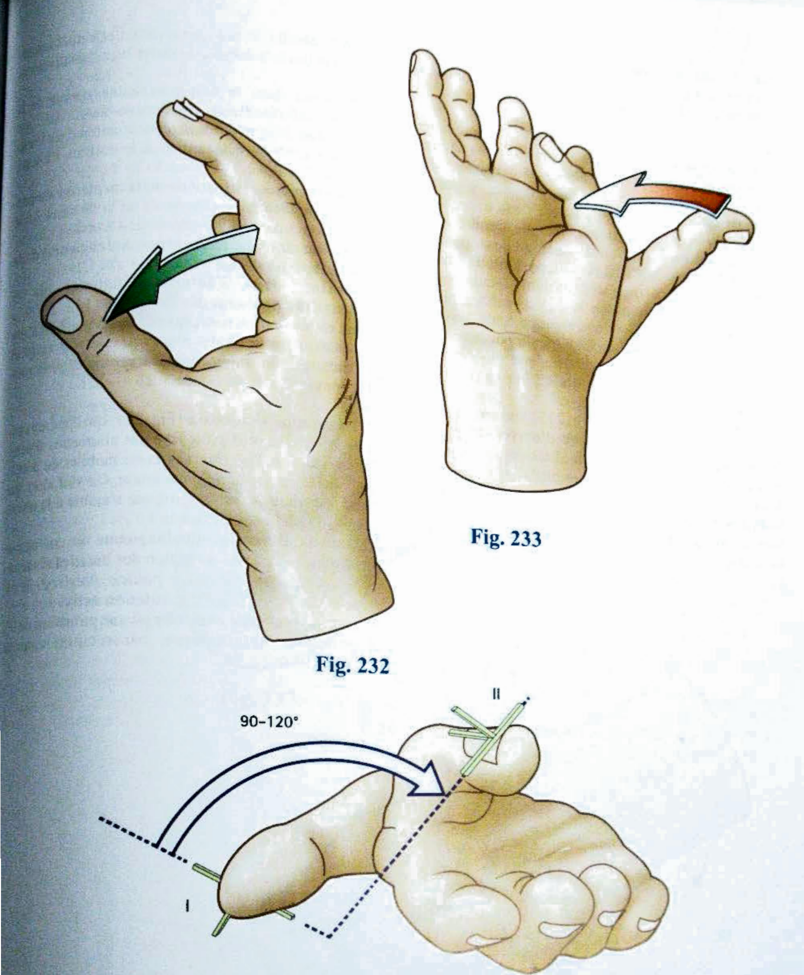


Fig. 233

Fig. 232

Fig. 234

La composante de pronation

La pronation de la colonne du pouce provient de **deux contingents de rotation**.

A. La rotation automatique due à l'action de la trapézo-métacarpienne, comme il a été dit plus haut, en se rappelant que les deux autres articulations métacarpo-phalangienne et inter-phalangienne y participent en ajoutant leur flexion à celle de la trapézo-métacarpienne ; ceci a pour effet de rendre l'axe longitudinal de la deuxième phalange quasi parallèle à l'axe principal **YX'** d'anté-rétroposition, faisant effectuer à cette phalange terminale une rotation cylindrique où toute rotation de la trapézo-métacarpienne autour de cet axe entraîne une rotation égale, un changement d'attitude égal, de la pulpe du pouce.

Ce mécanisme est facile à vérifier par soi-même sur le **modèle mécanique de la main** (voir en fin de volume).

De la **position de départ** (Fig. 235 : vue antéro-supérieure du modèle) à la **position d'arrivée** (Fig. 236) le changement d'attitude de la deuxième phalange et son opposition avec la dernière phalange de l'auriculaire ont pu être obtenus par simple mobilisation autour des quatre axes **XX'**, **YY'**, $\mathbf{f_1}$ et $\mathbf{f_2}$, sans aucune torsion du carton laquelle serait l'équivalent d'un « jeu mécanique » dans l'une des articulations.

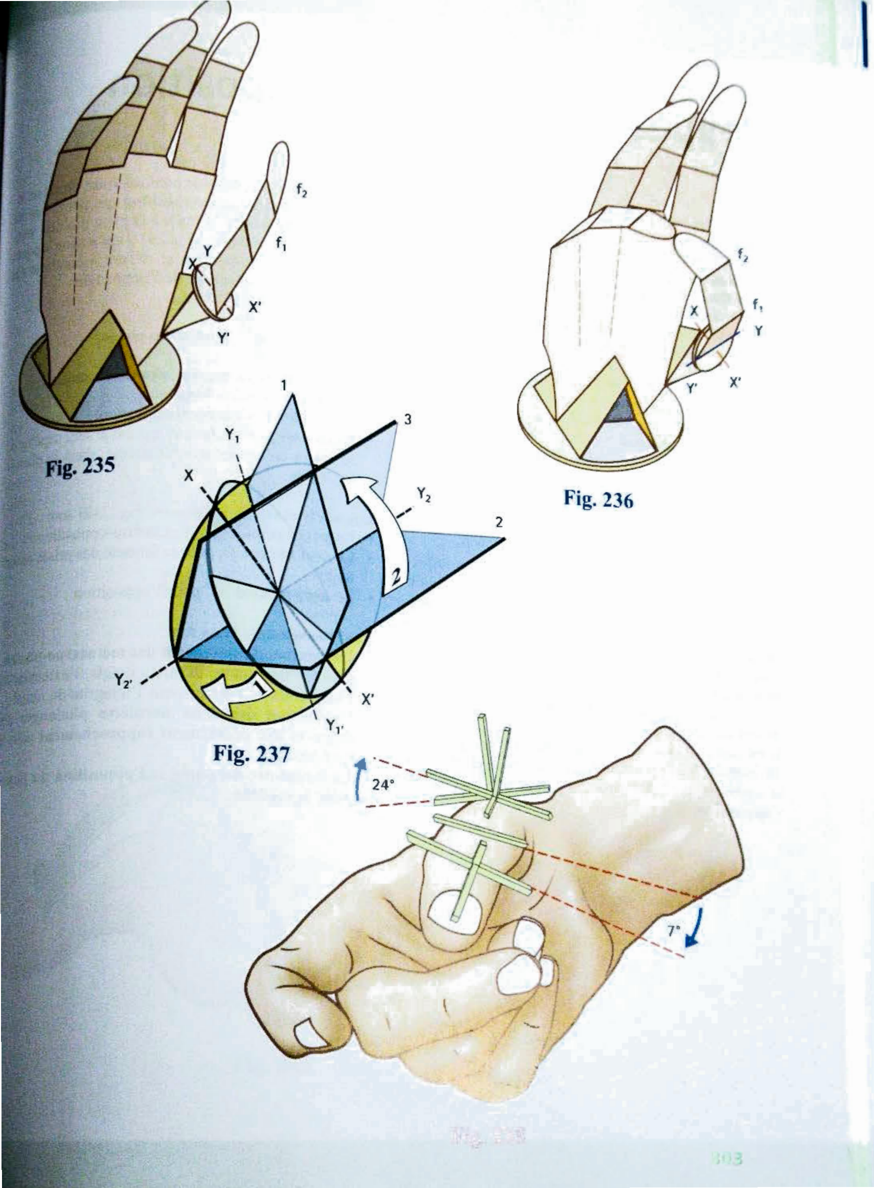
Dans le détail (Fig. 237), il a suffi d'effectuer successivement (ou simultanément) les quatre opérations suivantes :

1) **Rotation dans la trapézo-métacarpienne de la pièce intermédiaire du cardan** autour de l'axe **XX'** dans le sens d'une antéposition (flèche **1**) amenant le premier métacarpien de la position **1** à la position **2** et l'axe $\mathbf{Y_1Y_1'}$, en $\mathbf{Y_2Y_2'}$;
2) **Rotation dans la trapézo-métacarpienne du premier métacarpien** (flèche **2**) de la position **2** à la position **3** par flexion autour de l'axe $\mathbf{Y_2Y_2'}$;
3) **Flexion dans la métacarpo-phalangienne de la première phalange** autour de l'axe $\mathbf{f_1}$;
4) **Flexion dans l'inter-phalangienne de la deuxième phalange** autour de l'axe $\mathbf{f_2}$.

Ainsi est démontré, non plus par des arguments théoriques mais par des travaux pratiques, le rôle essentiel du cardan de la trapézo-métacarpienne dans la rotation longitudinale du pouce.

B. La rotation « ajoutée » (Fig. 238) qui apparaît clairement lorsqu'après avoir fixé des allumettes repères transversales sur les trois segments mobiles du pouce, on le porte en opposition maximum. On voit alors que cette pronation de **30°** environ qui s'ajoute à la précédente se situe à deux niveaux » :

- **Dans la métacarpo-phalangienne** où une pronation de 24° est due à l'action des muscles sésamoïdiens externes, *abductor pollicis brevis* et *flexor pollicis brevis*. C'est une **rotation active** ;
- **Dans l'inter-phalangienne** où une pronation de 7°, **purement automatique**, par rotation conique (Fig. 206).


f2
f1
X
Y
X'
Y'
Fig. 235
1
3
Y1
X
Y2
2
Y2'
X'
Y1'
Fig. 237
f2
f1
X
Y
Y'
X'
Fig. 236
24°
7°

L'opposition et la contre-opposition

Nous avons vu le rôle essentiel que joue la trapézo-métacarpienne, « **la reine** » pourrait-on dire, dans l'opposition du pouce ; il n'en reste pas moins vrai que **la métacarpo-phalangienne et l'inter-phalangienne permettent de distribuer l'opposition** sur l'un des quatre derniers doigts. C'est en effet grâce au **degré de flexion plus ou moins accentué** de ces deux articulations que le pouce peut choisir le doigt auquel il s'opposera.

Dans l'**opposition pouce-index** pulpe contre pulpe (Fig. 239), la métacarpo-phalangienne est très peu fléchie sans aucune pronation, ni inclinaison radiale. C'est son ligament latéral interne qui s'oppose à la déviation radiale du pouce sous la poussée de l'index ; l'inter-phalangienne est en *extension* ; mais il est d'autres modes d'opposition pouce-index, termino-terminale par exemple, où à l'inverse la métacarpo-phalangienne est complètement étendue et l'inter-phalangienne fléchie.

Dans l'**opposition pouce-auriculaire** termino-terminale (Fig. 240), la métacarpo-phalangienne est fléchie en inclinaison radiale et pronation, et l'inter-phalangienne fléchie. Dans l'opposition pulpo-pulpaire, l'inter-phalangienne est en extension.

L'**opposition avec les doigts intermédiaires, médius et annulaire**, est choisie grâce à une flexion, inclinaison radiale, pronation, dans les stades intermédiaires de ces cas extrêmes.

Il est donc possible de dire qu'à partir d'une position de base du premier métacarpien en opposition, **c'est la métacarpo-phalangienne qui permet de choisir l'opposition**.

L'opposition indispensable pour saisir les objets ne serait rien sans la **contre-opposition** qui permet de les lâcher ou de préparer la main à la prise d'objets volumineux. Ce mouvement (Fig. 241), qui amène le pouce dans le plan de la paume, se définit a contrario par trois composantes à partir de l'opposition :

- Extension ;
- Rétropulsion ;
- Supination de la colonne du pouce.

Les moteurs de la contre-opposition sont :

- ***L'abductor pollicis longus*** ;
- ***L'extensor pollicis brevis*** et surtout ;
- ***L'extensor pollicis longus*** qui est le seul capable de le porter en rétroposition extrême, dans le plan de la paume.

Les nerfs moteurs du pouce (Fig. 242) sont :

- Le **nerf radial R**, pour la contre-opposition ;
- Le **nerf ulnaire C**, pour la fermeté des prises et surtout ;
- Le **nerf médian M**, pour l'opposition.

Les mouvements tests sont :

- **L'extension du poignet et des métacarpo-phalangiennes** des quatre derniers doigts, l'extension et l'écartement du pouce pour l'intégrité du radial ;
- **L'extension des deux dernières phalanges** des doigts et leur **écartement rapprochement** pour le nerf ulnaire ;
- **La fermeture du poing et l'opposition du pouce pour le médian**.

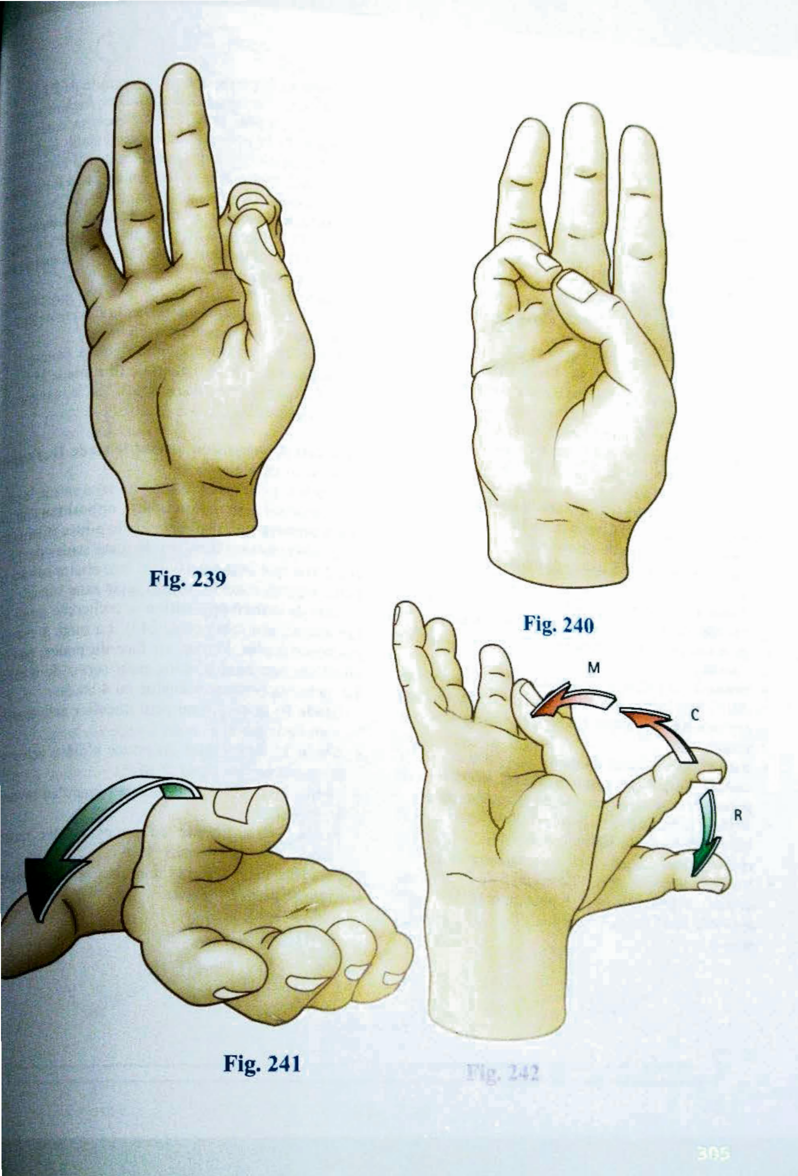


Fig. 239

Fig. 240

Fig. 241

Fig. 242

Il est difficile d'apprécier correctement le mouvement complexe de l'opposition, car les méthodes proposées à ce jour (p. 254) ne tiennent pas compte de la composante de rotation longitudinale de la colonne du pouce. L'auteur a proposé en 1986, un système de cotation, maintenant adopté quasi universellement, **les tests d'opposition et de contre-opposition**. Sans aucun instrument de mesure, ils utilisent comme système de référence le propre corps du patient ; praticables dans n'importe quel environnement, ils ont une résonance hippocratique. Le résultat se traduit par **un seul chiffre**, très facile à introduire dans les **tableaux statistiques**.

Dans le **test d'opposition** (Fig. 243), que les auteurs anglophones appellent le ***Total Opposition Test* (*T.O.T.*)**, actuellement inclus dans la nomenclature internationale, la main elle-même du patient sert de système de référence : le pouce, part de l'écartement maximum va parcourir la grande course d'opposition, au contact successif de la pulpe des autres doigts, de la face palmaire de l'auriculaire, puis de la paume.

L'**échelle de cotation** comporte **dix stades**, de l'opposition nulle à l'opposition maximum :

- **Stade 0** : la pulpe du pouce siège au contact de la face externe **P1** de l'index : la main est plate et l'opposition nulle ;
- **Stade 1** : la pulpe du pouce est au contact de la face externe de **P2** de l'index, ce qui nécessite une légère antéposition du pouce et une légère flexion de l'index ;
- **Stade 2** : la pulpe du pouce atteint la face externe de **P3** de l'index, dont la flexion a augmenté. L'antéposition de la colonne du pouce a légèrement augmenté ;
- **Stade 3** : l'extrémité du pouce s'oppose avec l'extrémité **P3** de l'index, qui est fléchi ; la colonne du pouce en extension, subit une légère adduction ;
- **Stade 4** : l'extrémité du pouce atteint l'extrémité de **P3** du majeur : l'adduction a augmenté, la M.P. fléchit légèrement, mais l'I.P. reste en extension ;
- **Stade 5** : le pouce atteint l'extrémité de **P3** de l'annulaire : augmentation de l'adduction et de l'antéposition, la M.P. fléchit un peu plus, et l'I.P. légèrement ;
- **Stade 6** : le pouce atteint l'extrémité de **P3** de l'auriculaire : l'antéposition atteint son maximum, presque autant pour la M.P. ; l'I.P. reste en extension ;
- **Stade 7** : le pouce touche l'auriculaire légèrement fléchi au niveau du pli palmaire de l'IPD : la flexion de l'I.P. augmente ; la flexion de la M.P est déjà à son maximum ;
- **Stade 8** : le pouce atteint l'auriculaire légèrement fléchi au niveau du pli palmaire de l'IPP : la flexion de l'I.P. augmente encore ; T.M. et M.P. sont en amplitude maximum ;
- **Stade 9** : le pouce touche la base de l'auriculaire au niveau du pli digito-palmaire : la flexion de l'I.P. est presque à son maximum ;
- **Stade 10** : le pouce atteint, dans la paume, le pli palmaire distal : la flexion de l'I.P., de la M.P. et de la T.M. atteint son maximum. C'est le maximum de l'opposition.

Si le test d'opposition atteint le stade 10, l'opposition est normale.

Cependant, pour que ce test ait toute sa valeur, le pouce doit parcourir la grande course : l'**opposition doit toujours ménager un espace entre le pouce et la paume** (Fig. 244), surtout dans les derniers stades de 6 à 10. Il est vrai que le point 10 peut être atteint suivant une petite course, mais le test est alors sans valeur.

Le **test de contre-opposition** se recherche sur un plan horizontal, une table (Fig. 245). La main à examiner est posée à plat, l'autre, en face du pouce, posée de chant sur son bord ulnaire, pour servir de référence. La contre-opposition s'évalue en 4 stades :

- **Stade 0** : le pouce ne peut décoller activement du plan de la table ;
- **Stade 1** : l'extrémité du pouce s'élève activement jusqu'au niveau de la 5ᵉ M.P. ;
- **Stade 2** : il s'élève activement jusqu'au niveau de la 4ᵉ M.P. ;
- **Stade 3** : l'extrémité du pouce s'élève rarement jusqu'au niveau de la 3ᵉ M.P.

Un stade 2 ou 3 indique une **efficacité normale de l'*extensor pollicis longus***.

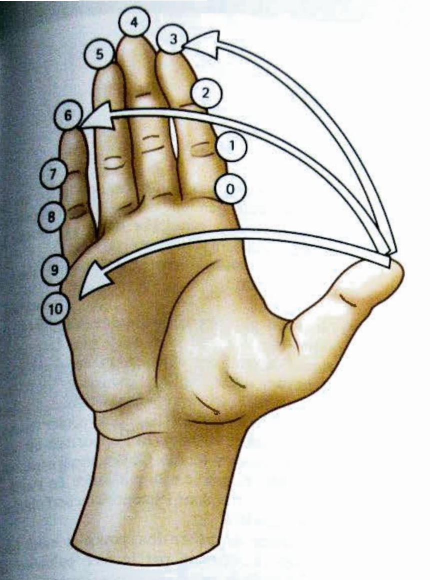


Fig. 243

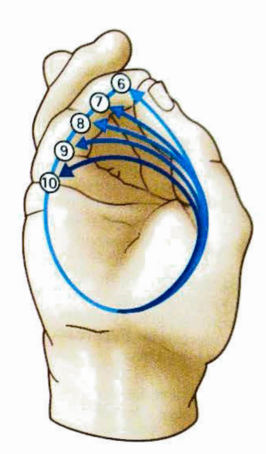


Fig. 244

Fig. 245

Les modes de préhension

La complexe organisation anatomique et fonctionnelle de la main concourt à la préhension ; cependant il n'y a pas un, mais de nombreux types de préhension, répartis en trois grands groupes : les **prises proprement dites** qu'on peut aussi appeler des **pinces**, les **prises avec la pesanteur**, les **prises-plus-actions**. Ceci ne résume pas toutes les possibilités d'action de la main : outre la préhension, elle est encore capable de percussions, de contact et d'expression gestuelle. Nous les étudierons donc successivement.

La préhension proprement dite

Les prises ou pinces proprement dites se classent en **trois groupes** : les **prises digitales**, les **prises palmaires**, les **prises centrées**. Elles ne nécessitent pas la participation de la pesanteur.

Les prises ou pinces digitales

Elles se répartissent elles-mêmes en deux sous-groupes : les **pinces bi-digitales** et les **pinces pluri-digitales** ;

A. Les pinces bi-digitales constituent la classique pince-pollicidigitale en général pouce-index. Elles sont elles-mêmes de trois types, suivant que l'opposition est terminale, sub-terminale, ou sub-termino-latérale.

1) **La pince par opposition terminale ou termino-pulpaire** (Fig. 246 et 247) est la plus fine et la plus précise. Elle permet de tenir un objet de petit calibre (Fig. 246) ou de ramasser un objet très fin : une allumette ou une épingle (Fig. 247). Le pouce et l'index (ou le médius) s'opposent par l'extrémité de la pulpe et même pour certains objets très fins (saisir un poil) par la tranche de l'ongle. Il faut donc une pulpe élastique et correctement étayée par l'ongle, dont le rôle est primordial dans ce mode de préhension. Pour cette raison, on peut aussi l'appeler **prise pulpo-unguéale**. C'est le mode de préhension le plus facilement compromis par la moindre affection de la main ; en effet, il nécessite un jeu articulaire total, car la flexion est poussée à son maximum, et surtout l'intégrité des groupes musculaires et tendons, en particulier :
   - Le ***flexor digitorum profondus*** de l'index, qui stabilise la phalangette en flexion, d'où l'importance d'une réparation prioritaire du F.C.P. lorsque les deux fléchisseurs sont sectionnés ;
   - Le ***flexor pollicis longus*** pour la même raison, du côté du pouce.

2) **La pince par opposition subterminale ou pulpaire** (Fig. 248) est le mode le plus courant. Elle permet de tenir des objets relativement plus gros : un crayon ou une feuille de papier : le test d'efficacité de la préhension pulpaire subterminale consiste à tenter d'arracher une feuille de papier tenue serrée entre pouce et index. Si l'opposition est bonne, on ne peut tirer la feuille. Ce test, aussi appelé **signe de Froment**, apprécie la puissance de l'*adductor pollicis brevis*, et donc l'intégrité du nerf ulnaire qui le commande.

Dans ce mode de préhension, pouce et index (ou un autre doigt) s'opposent par la face palmaire de la pulpe. L'état de la pulpe est naturellement important, mais l'articulation inter-phalangienne distale peut être en extension ou même bloquée en demi-flexion par une arthrodèse. Les muscles essentiels pour ce mode de préhension sont :
- Le *flexor digitorum superficialis* de l'index : stabilisation en flexion de **P2** ;
- Les muscles thénariens fléchisseurs de **P1** du pouce : *flexor pollicis brevis*, *interosseus palmaris primus*, *abductor pollicis brevis* et surtout *adductor pollicis*.

3) **La pince par opposition subtermino-latérale ou pulpo-latérale** (Fig. 249), comme lorsqu'on tient une pièce de monnaie. Ce mode de préhension peut suppléer l'opposition terminale ou subterminale lorsque les deux dernières phalanges de l'index ont été amputées : la prise est moins fine mais néanmoins solide. La face palmaire de la pulpe du pouce s'appuie sur la face externe de **P1** de l'index. Les muscles essentiels pour ce mode de préhension sont :
- L'*interosseus dorsalis primus indicis* pour stabiliser l'index latéralement, qui est en outre étayé par les autres doigts ;
- Le *flexor pollicis brevis*, *l'interosseus palmaris primus* et surtout l'*adductor pollicis*, dont l'activité a été confirmée par électromyographie.

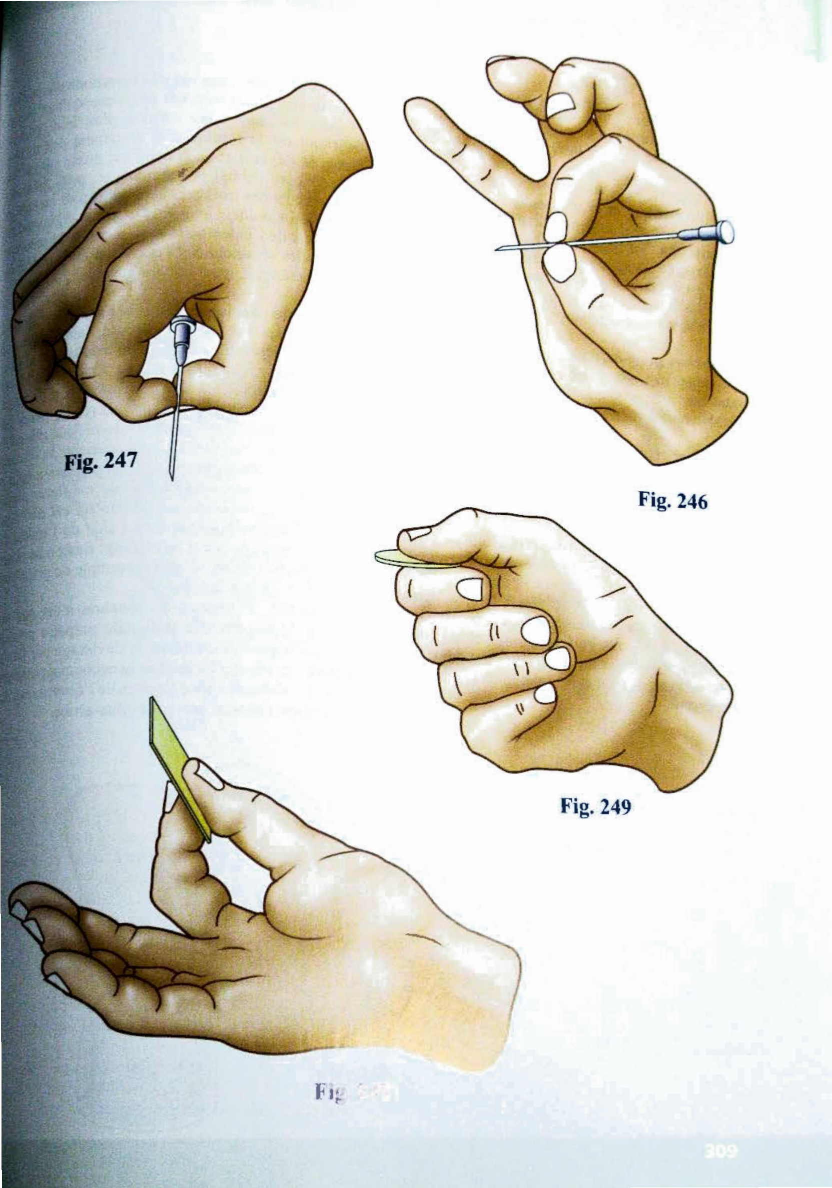


Fig. 247

Fig. 246

Fig. 249

Fig [illegible]

4) Parmi les prises bidigitales, il en est une qui ne constitue pas une pince pollicidigitale, c'est la **préhension inter-digitale latéro-latérale** (Fig. 250) - c'est un mode de préhension très accessoire : tenir une cigarette, par exemple, ou tout autre petit objet. Il se pratique, en général, entre l'index et le médius ; le pouce n'intervient pas. Le diamètre de l'objet saisi doit être faible. Les muscles entrant en jeu sont les *interossei* (deuxième palmaire et dorsal). La prise est faible et sans précision, mais elle est très utile, car les amputés du pouce arrivent à la développer de façon étonnante.

B. Les prises pluri-digitales font intervenir, outre le pouce, deux, trois ou quatre autres doigts. Elles permettent une préhension beaucoup plus ferme que la bi-digitale qui reste une prise de précision.

1) **Les prises tridigitales** intéressent pouce, index et médius et sont les plus fréquemment utilisées. Une partie importante, sinon prépondérante de l'humanité, qui ne connaît encore pas l'usage de la fourchette, l'utilise pour porter les aliments à la bouche. Elle ressemble alors à la **prise tridigitale pulpaire** (Fig. 251) telle qu'elle est employée pour tenir une petite balle où le pouce oppose sa pulpe à celle de l'index et du médius par rapport à l'objet. Écrire avec un crayon par exemple (Fig. 252) nécessite une prise tridigitale, pulpaire pour l'index et le pouce, latérale pour la troisième phalange du médius qui sert de support de même que le fond de la première commissure.

En ce sens, cette prise est très directionnelle et s'apparente aux prises centrées de même qu'aux prises-plus-actions, que nous verrons plus loin, puisque l'écriture est le résultat non seulement des mouvements de l'épaule et de la main qui glisse sur la table sur son bord cubital et l'auriculaire, mais aussi des mouvements des trois premiers doigts qui mettent en jeu le *flexor pollicis longus* et le *flexor digitorum superficialis* de l'index pour le va-et-vient du crayon et les muscles sésamoïdiens externes et le deuxième *interosseus dorsalis* pour son maintien.

L'action **de dévisser le bouchon d'un flacon** (Fig. 253) est une prise tridigitale, latérale pour le pouce et la deuxième phalange du médius qui s'opposent directement et pulpaire pour l'index qui bloque l'objet sur le troisième côté. Le majeur sert de butoir, appuyé sur l'annulaire et l'auriculaire. Le pouce applique fortement le bouchon sur le majeur grâce à la contraction de tous les muscles thénariens ; le verrouillage est commencé grâce au *flexor pollicis longus* et terminé par l'index sous l'action de son *flexor digitorum superficialis*. Lorsque le bouchon est débloqué, son dévissage se poursuit sans l'aide de l'index, par déroulement du pouce et du médius : flexion du pouce, extension du médius. C'est un exemple de prise-plus-action (voir plus loin)
Si au départ, le vissage du bouchon n'est pas trop serré, la prise peut être tridigitale pulpaire pour les trois doigts avec mouvement de dévissage par flexion du pouce, extension du médius et accompagnement de l'index en abduction sous l'action de l'*interosseus dorsalis primus* : encore une prise-plus-action.

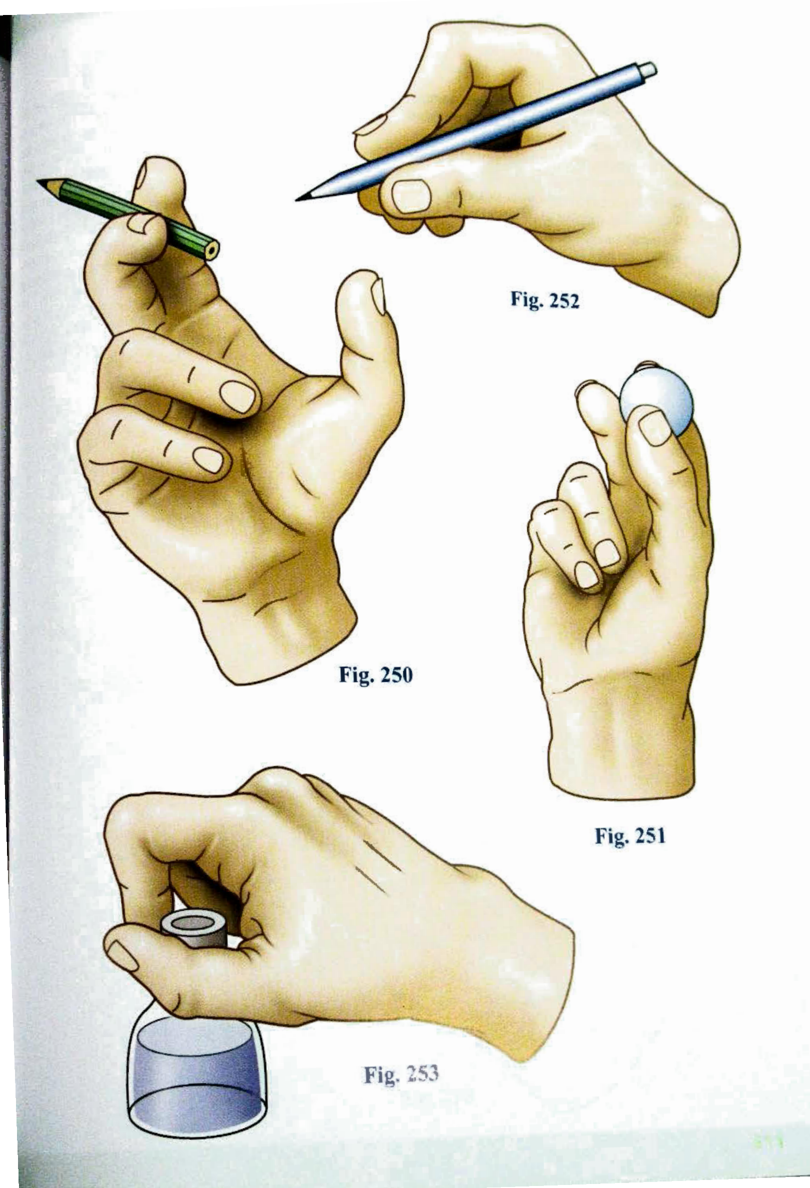


Fig. 252

Fig. 250

Fig. 251

Fig. 253

2) **Les prises tétradigitales** sont utilisées lorsque l'objet est plus gros et doit être plus fermement saisi. La prise peut alors être :

- **Tétradigitale pulpaire** (Fig. 254) lorsqu'elle saisit un objet sphérique comme une balle de ping-pong. On remarque alors que le contact est pulpaire pour le pouce, l'index et le majeur alors qu'elle est latérale sur la troisième phalange de l'annulaire dont le rôle est d'empêcher la fuite de l'objet vers le dedans ;
- **Tétradigitale pulpo-latérale** (Fig. 255) lors du dévissage d'un couvercle. En effet, le contact est large sur le pouce, intéressant la pulpe et la face palmaire de la première phalange de même que sur l'index et le majeur ; il est pulpaire et latéral sur la deuxième phalange de l'annulaire qui bloque l'objet en dedans. « L'encerclement » du couvercle par les quatre doigts imprime un mouvement de spirale aux deuxième, troisième et quatrième doigts et l'on peut démontrer que la résultante des forces qu'ils exercent s'annule au centre du couvercle qui se projette en regard de la métacarpo-phalangienne de l'index ;
- **Tétradigitale pulpaire pollici-tridigitale** (Fig. 256) comme lorsqu'on tient un fusain, un pinceau ou un crayon : la pulpe du pouce applique et maintient fortement l'objet contre la pulpe de l'index, du majeur et de l'annulaire en extension presque complète. C'est aussi la manière dont un violoniste et un violoncelliste tiennent leur archet.

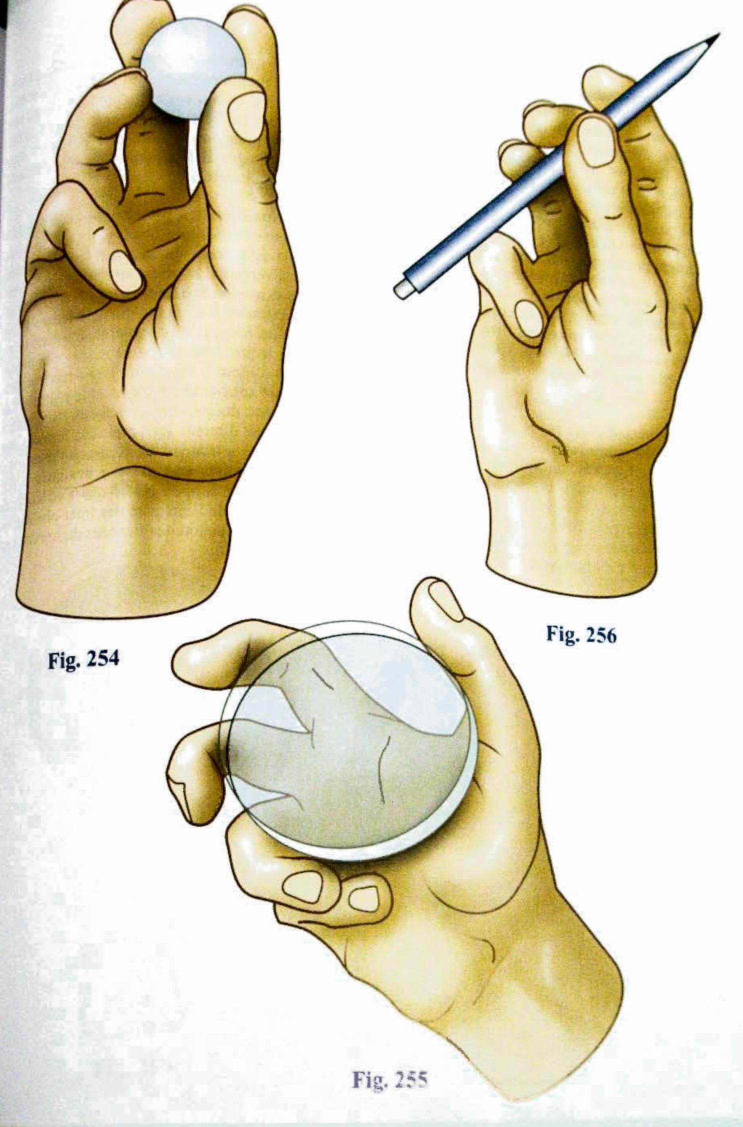


Fig. 254

Fig. 256

Fig. 255

3) **Les prises pentadigitales** emploient tous les doigts, le pouce s'opposant de façon variée aux autres. Elles sont utilisées, en général, pour saisir de gros objets. Cependant, lorsqu'il est petit, il peut être saisi dans une **prise pentadigitale pulpaire** (Fig. 257), seul le cinquième prenant un contact latéral. Si l'objet devient plus volumineux, une balle de tennis par exemple, elle devient une **prise pentadigitale pulpo-latérale** (Fig. 258) : les quatre premiers doigts prennent contact par toute leur face palmaire et enveloppent presque complètement l'objet, le pouce s'opposant aux trois autres et l'auriculaire empêchant par sa face externe toute échappée en dedans et proximalement. Bien que n'étant pas une prise palmaire, la balle se situant plus dans les doigts que dans la paume, cette prise est déjà très ferme.

Une autre prise pentadigitale qu'on pourrait nommer **prise pentadigitale commissurale** (Fig. 259) saisit de gros objets hémisphériques, un bol par exemple, en l'enveloppant dans la première commissure : pouce et index largement étendus et écartés prennent contact avec toute leur face palmaire, ce qui nécessite une grande souplesse et des possibilités normales d'écartement de la première commissure. Ceci n'est pas le cas après les fractures du premier métacarpien ou les blessures du premier espace où l'on assiste à une rétraction de cette commissure. Le bol est en outre soutenu (Fig. 260) par le majeur, l'annulaire et l'auriculaire qui ne prennent contact que par leurs deux dernières phalanges. Il s'agit donc bien d'une prise digitale et non palmaire.

La **prise pentadigitale « panoramique »** (Fig. 261) permet de saisir de très gros objets plats, une soucoupe par exemple. Elle nécessite un grand écart des doigts, largement divergents, le pouce se portant en rétroposition et en extension extrêmes se trouve en contre-opposition maximum. Il s'oppose diamétralement à l'annuaire (flèches rouges) avec lequel il sous-tend un arc de 180° sur lequel s'accrochent l'index et le majeur. L'auriculaire « mord » sur l'autre demi-cercle de telle sorte que l'arc sous-tendu entre lui et le pouce soit de **215°** ; ces deux doigts, en écartement maximum, à l'octave comme diraient les pianistes, forment avec l'index une prise « triangulaire » presque régulière et avec les autres doigts **une prise « araignée »** dont l'objet ne peut s'échapper. Noter que l'efficacité de cette prise dépend de l'intégrité des inter-phalangiennes distales et de l'action des flexores digitorum profondi (pluriel latin !).

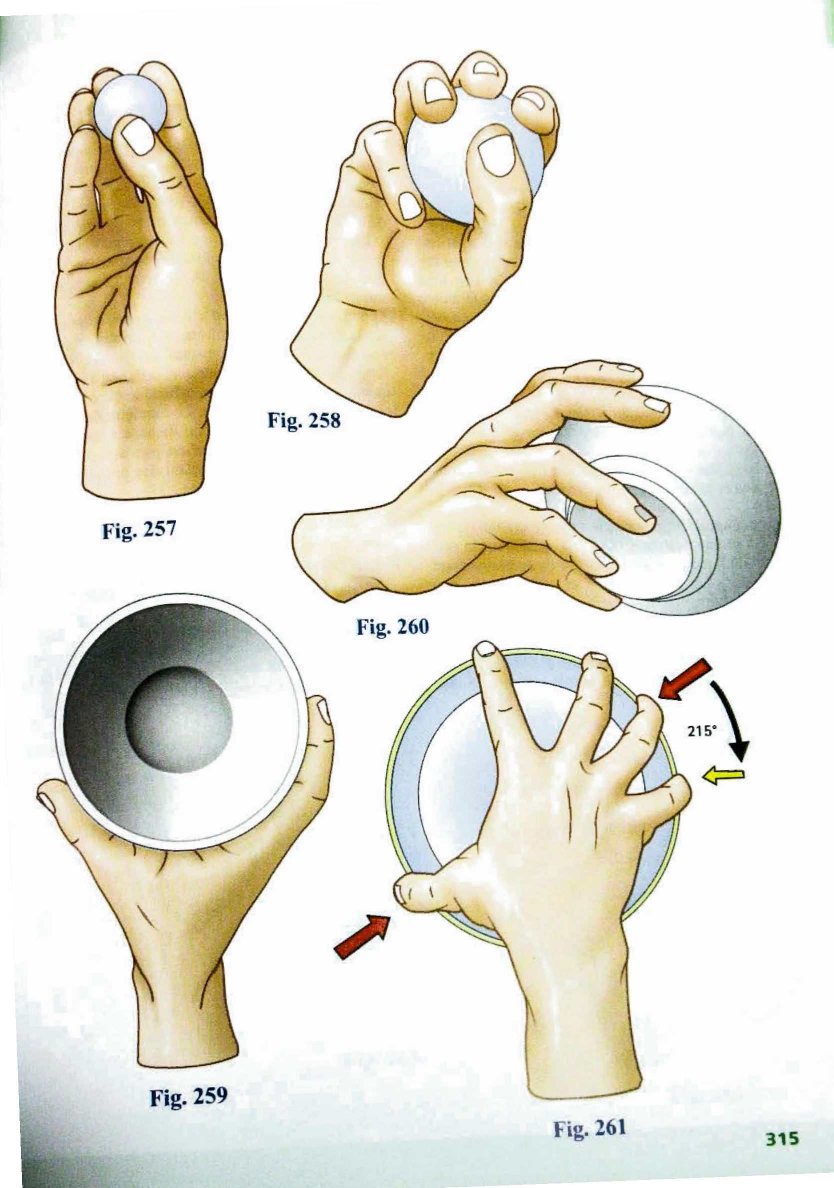


Fig. 257

Fig. 258

Fig. 259

Fig. 260

Fig. 261

Les prises palmaires

Les prises palmaires font intervenir la paume de la main, en plus des doigts. Elles sont de deux types suivant que le pouce est utilisé ou non.

A. La prise digito-palmaire (Fig. 262) oppose la paume avec les quatre derniers doigts. C'est un mode de prise accessoire mais assez souvent utilisé lorsqu'on manœuvre un levier ou que l'on tient un volant. L'objet de diamètre assez faible (3 à 4 cm) est saisi entre les doigts fléchis et la paume, et le pouce n'intervient pas : la prise n'est ferme, jusqu'à un certain point, que dans le sens distal ; vers le poignet, l'objet peut échapper facilement, la prise n'est pas verrouillée. On remarque en outre que l'axe de la prise est perpendiculaire à l'axe de la main et ne suit pas la direction oblique de la gouttière palmaire. Cette préhension digito-palmaire peut aussi servir à saisir un objet plus volumineux, un verre par exemple (Fig. 263), mais plus le diamètre de l'objet est important, plus la prise manque de fermeté.

B. La préhension palmaire à « pleine main » ou encore **« à pleine paume »** (Fig. 264 et 265) est la préhension de force pour les objets lourds et relativement volumineux. Un terme ancien et actuellement peu usité, **la poigne**, convient parfaitement pour désigner ce genre de prise et mérite d'être remis à l'honneur, de préférence au terme anglais grasp. Autour des **objets cylindriques** (Fig. 264) la main s'enroule littéralement ; l'axe de l'objet prend la même direction que l'axe de la gouttière palmaire, c'est-à-dire oblique de la base de l'éminence hypothénar à la base de l'index. Cette obliquité, par rapport à l'axe de la main et de l'avant-bras, trouve sa correspondance dans l'inclinaison de la crosse des outils (Fig. 265) et malheureusement aussi des armes, qui forme un angle de 100 à 110°. Il est facile de remarquer que l'on peut plus facilement compenser un angle trop ouvert (120 à 130°) grâce à l'inclinaison ulnaire du poignet, qu'un angle trop fermé (90°), car l'inclinaison radiale est bien moins ample.

Le volume de l'objet saisi conditionne la force de préhension : il est optimum lorsqu'il permet au pouce de venir au contact (ou presque) de l'index. Le pouce forme, en effet, la butée unique, opposée à la force des quatre autres doigts, et son efficacité est d'autant plus grande qu'il est plus fléchi. Le diamètre des crosses et des manches d'outils dépend de cette constatation.

La forme de l'objet saisi n'est pas non plus indifférente et l'on réalise maintenant des poignées présentant des empreintes de doigts.

Les **muscles nécessaires** à ce mode de préhension sont :

- Les *flexores digitorum superficialis* et *profondi* et surtout les *interossei* pour la flexion puissante de la première phalange des doigts ;
- Tous les muscles de l'éminence thénar, l'*adductor pollicis brevis* surtout et le *flexor pollicis longus* pour verrouiller la prise grâce à la flexion de la deuxième phalange.



Fig. 263

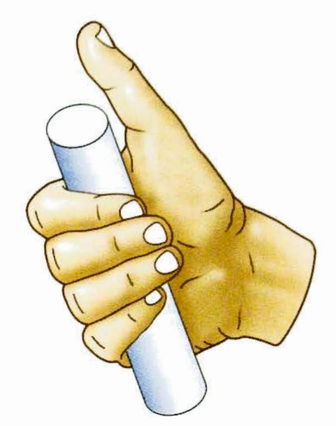


Fig. 262



Fig. 265

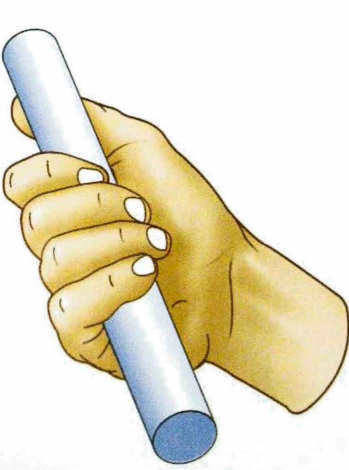


Fig. 264

1) Lorsque la **prise palmaire cylindrique** s'applique à des **objets de diamètre important** (Fig. 266 et 267), la prise est d'autant moins ferme que le diamètre est plus important. Le verrouillage dépend alors, comme nous l'avons vu précédemment, de l'action de la métacarpo-phalangienne qui permet au pouce de parcourir une directrice du cylindre, c'est-à-dire un cercle, soit le plus court chemin pour en faire le tour. D'autre part, le volume de l'objet exige la liberté d'écartement maximum de la première commissure.

2) **Les prises palmaires sphériques** peuvent concerner trois, quatre ou cinq doigts. Lorsqu'elles font intervenir trois (Fig. 268) ou quatre doigts (Fig. 269) le dernier doigt concerné en dedans, soit le majeur dans la prise sphérique tridigitale, ou l'annulaire dans la prise sphérique tétradigitale, prend un contact latéral externe avec l'objet formant butée interne, épaulé par les doigts restants à savoir l'auriculaire seul ou associé à l'annulaire. Cette butée s'oppose à la pression du pouce et l'objet se trouve verrouillé distalement par le ou les « crochets » des doigts qui prennent un contact palmaire avec l'objet.

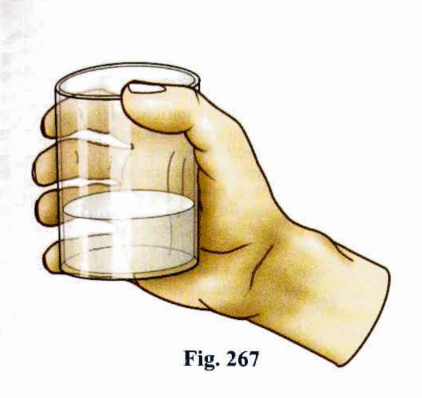


Fig. 267



Fig. 266

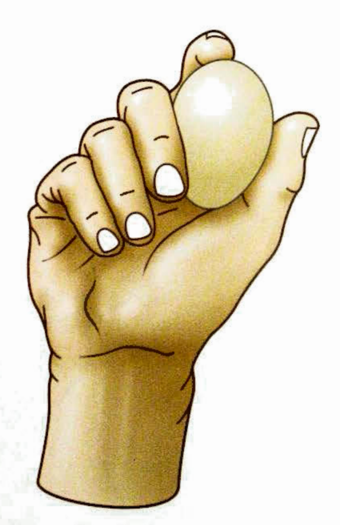


Fig. 268



Fig. 269

Dans la **prise palmaire sphérique pentadigitale** (Fig. 270) tous les doigts prennent contact avec l'objet par leur face palmaire. Le pouce s'oppose à l'annulaire ; ils occupent ensemble le plus grand diamètre et le verrouillage de la prise est assuré distalement par l'index et le majeur et proximalement par l'éminence thénar et l'auriculaire. La prise est très ferme, grâce à la participation de tous les doigts en crochets et de la paume. Ceci suppose à la fois les possibilités maximum d'écartement commissural et l'efficacité des *flexores superficiales* et *profondi*, prend contact avec toute la paume. Cette prise est beaucoup plus symétrique que les deux précédentes et, en ce sens, elle fait la transition avec les suivantes.

Les prises centrées

Les prises centrées réalisent, en effet, une symétrie autour d'un axe longitudinal qui se confond en général avec l'axe de l'avant-bras. Ceci est évident pour la **baguette du chef d'orchestre** (Fig. 271) qui ne fait ici que prolonger la main et représente une extrapolation de l'index dans son rôle indicateur. Ceci est mécaniquement indispensable dans la **prise du tournevis** (Fig. 272) qui se confond alors avec l'axe de prono-supination dans l'acte de visser ou dévisser. C'est aussi net dans la **prise d'une fourchette** (Fig. 273) ou d'un couteau qui ne font que prolonger distalement la main vers l'index. Dans tous les cas, l'objet de forme allongée est saisi fermement par une prise palmaire faisant intervenir le pouce et les trois derniers doigts, l'index jouant alors un **rôle directif essentiel** pour orienter l'outil.

Les prises centrées ou directionnelles sont très utilisées ; elles nécessitent l'intégrité de flexion des trois derniers doigts, l'extension complète de l'index dont les fléchisseurs doivent être efficaces, et un minimum d'opposition du pouce pour lequel la flexion de l'inter-phalangienne n'est pas indispensable.

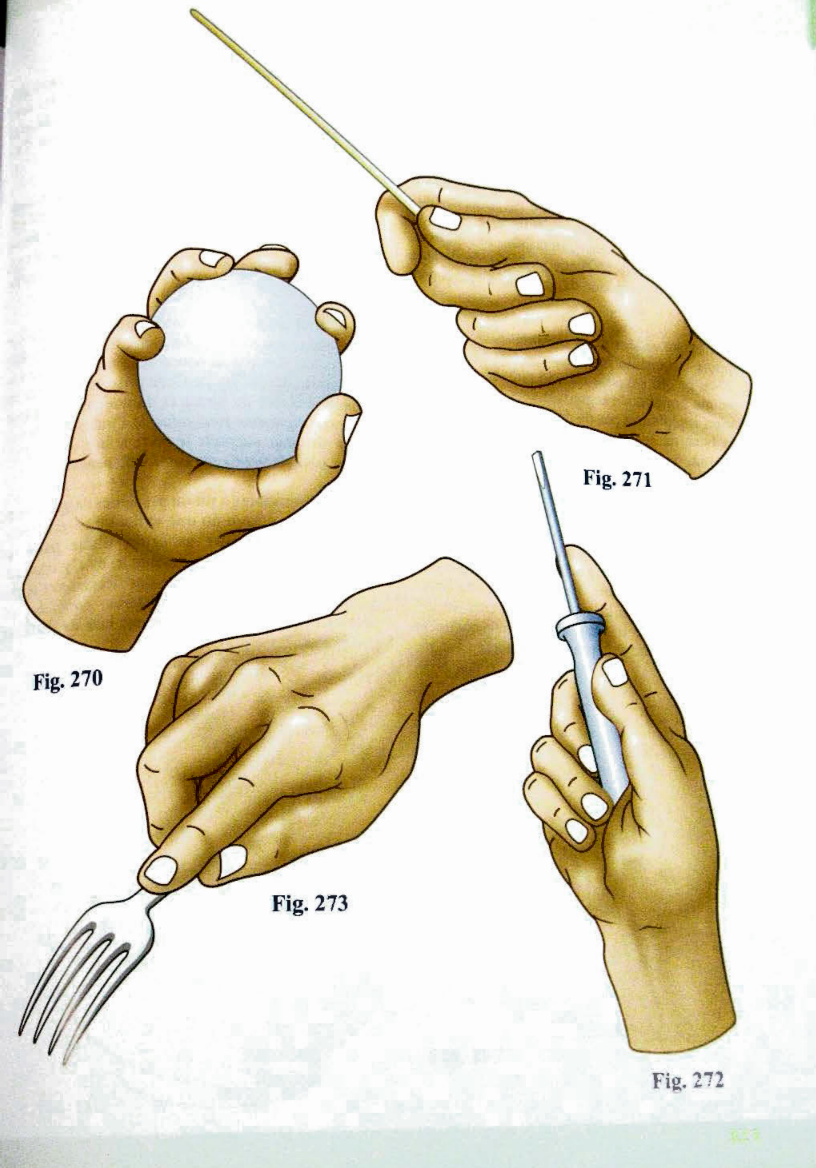


Fig. 270

Fig. 271

Fig. 272

Fig. 273

Prises avec la pesanteur

Les modes de préhension envisagés jusqu'ici ne nécessitent pas l'intervention de la pesanteur : ils restent valables même dans un vaisseau spatial. Par contre, il existe des types de préhension pour lesquels la **pesanteur est indispensable**, ceux qui sont d'usage à la surface de notre planète. Si la pesanteur est nulle, les muscles s'atrophient, si elle est plus forte, comme sur Jupiter par exemple, les muscles doivent se renforcer : voilà pour les sportifs un mode physique de dopage, mais il est très incommode de vivre dans une centrifugeuse !

Dans ces **prises aidées de la pesanteur,** la main sert de support comme lorsqu'elle soutient **un plateau** (Fig. 274), ce qui suppose qu'elle puisse se mettre à plat, paume horizontale regardant vers le haut, donc, supination complète et pas de doigts en crochet, ce qui est à la base du **test du serveur**, ou qu'elle puisse constituer un trépied sous l'objet à supporter.

Grâce à la pesanteur, la main peut aussi se comporter **comme une cuillère** comme lorsqu'elle contient **des grains** (Fig. 275), de la farine, ou un liquide. Le creux de la paume est alors prolongé par celui des doigts rapprochés de façon jointive par action des *interossei palmaris* pour éviter les fuites. Le pouce très important dans cette action ferme la gouttière palmaire en dehors : à demi fléchi, il vient s'appliquer contre le deuxième métacarpien et la première phalange de l'index sous l'action de l'adducteur. Une **conque** plus vaste peut être formée par **l'association des deux mains** (Fig. 276) creusées en deux demi-conques et accolées par leur bord ulnaire, dans un **geste d'offrande**.

Tous ces modes de préhension par soutien nécessitent **l'intégrité de la supination** : sans elle, en effet, la paume, seule partie de la main susceptible de constituer une paroi concave, ne peut s'orienter vers le haut, aucune suppléance de la supination n'étant possible par l'épaule.

La prise d'un bol par trois doigts (Fig. 277) utilise la pesanteur car sa circonférence est saisie entre deux butées, formées par le pouce et le majeur, et un crochet constitué par l'index. Cette prise nécessite une excellente stabilité du pouce et du majeur et l'intégrité du *flexor digitorum profondus* de l'index dont la troisième phalange supporte le porte à faux du bol. L'*adductor pollicis brevis* est aussi indispensable.

Les **prises-crochets à un ou plusieurs doigts**, comme pour **porter un seau ou une valise** ou encore comme pour **s'accrocher aux aspérités d'une paroi rocheuse**, utilisent aussi la pesanteur, en s'y opposant, et nécessitent aussi l'intégrité des fléchisseurs et plus particulièrement du *flexor digitorum profondus*, qui peut **se rompre accidentellement lors de certaines prises chez les alpinistes**.

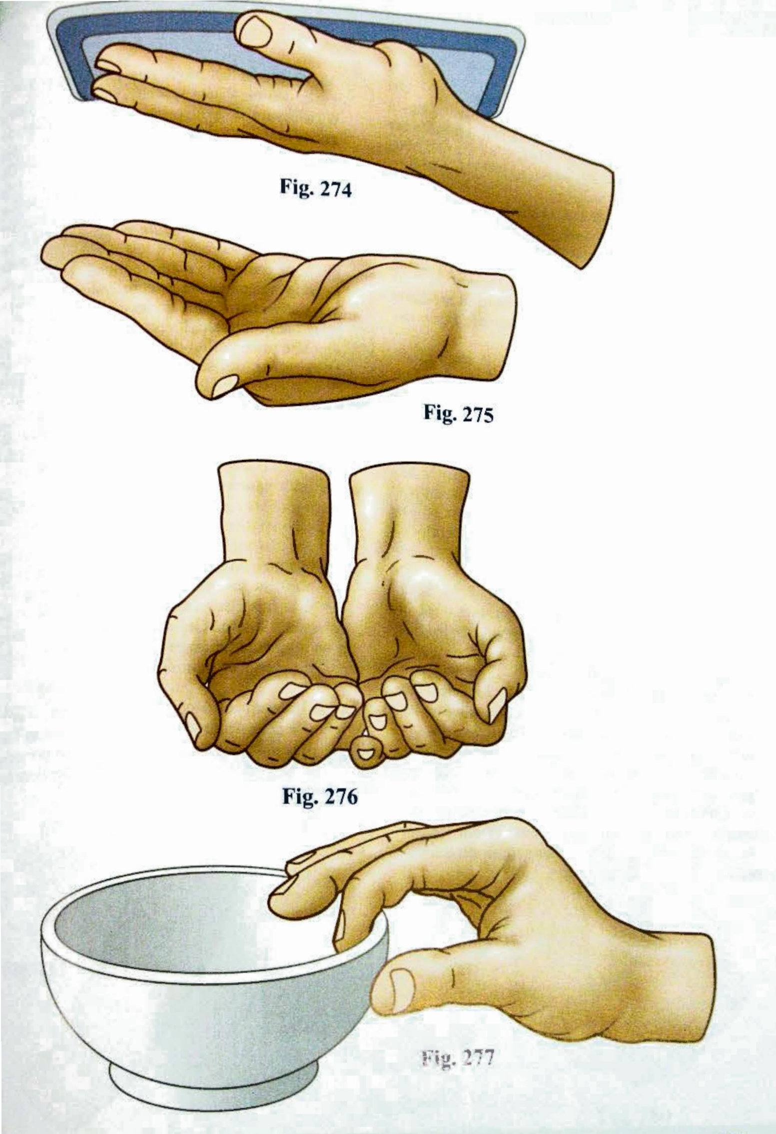


Fig. 274

Fig. 275

Fig. 276

Fig. 277

Les prises-plus-action

Les prises statiques déjà décrites ne suffisent pas à épuiser toutes les possibilités de la main. **La main est aussi capable d'agir en prenant**. C'est ce que nous appellerons les **Prises-Plus-Action** (PPA) ou plus simplement, **prises-actions**.

Certaines de ces actions sont élémentaires comme par exemple **lancer une toupie** (Fig. 278) un toton, par une prise pouce-index tangentielle, ou bien encore **lancer une bille** (Fig. 278) par brusque détente de la deuxième phalange du pouce due à l'action de l'*extensor pollicis longus*, la bille maintenue au préalable dans la concavité de l'index complètement fléchi par le *flexor profondus*.

D'autres actions sont plus complexes, la main effectuant une **action réfléchie sur elle-même**. Dans ce cas, l'objet maintenu par une partie de la main subit une action provenant d'une autre partie. Ces prises-actions où la main agit sur elle-même sont **innombrables** ; on peut prendre pour exemple :

- **Allumer un briquet** (Fig. 280) qui ressemble assez au lancer de la bille, le briquet étant tenu dans la concavité de l'index et des autres derniers doigts tandis que le pouce en crochet appuie sur le mécanisme par action du *flexor pollicis longus* et des muscles thénariens ;
- **Activer une « bombe » aérosol** (Fig. 281) : cette fois, l'objet est saisi en prise palmaire et c'est la flexion de l'index en crochet qui appuie sur le bouchon par action du *flexor profondus* ;
- **Couper avec des ciseaux** (Fig. 282) : les anneaux sont enfilés par le pouce d'une part, le majeur ou l'annulaire d'autre part. Le pouce est essentiellement moteur aussi bien dans la fermeture des ciseaux grâce aux muscles thénariens, que dans leur ouverture par l'*extensor pollicis longus*. L'écartement des anneaux peut, lorsqu'il est répété dans un geste professionnel, entraîner la rupture de cet extenseur. L'index oriente les ciseaux, ce qui constitue un exemple de **prise-plus-action directionnelle** ;
- **Manger avec les baguettes chinoises** (Fig. 283), l'une des baguettes restant fixe, bloquée dans la commissure du pouce par l'annulaire, l'autre baguette mobilisée dans une prise tridigitale pouce-index-majeur forme une pince avec la première. Ceci constitue certainement un bon test d'habileté manuelle pour un Européen, les Asiatiques le réalisant de façon quasi inconsciente dès leur plus jeune âge ;
- **Faire des nœuds avec une seule main** (Fig. 284). Il s'agit, là encore, d'un test d'habileté manuelle, qui n'est pas donné à tout le monde et qui suppose l'action indépendante et coordonnée de deux pinces bidigitales, l'une index-majeur, agissant par prise latéro-latérale, l'autre pouce-annulaire, réalisant une prise pollici-digitale assez peu usitée. **Les chirurgiens** utilisent une méthode voisine, plus simple, pour faire les nœuds d'une seule main. Ces actions multiples d'une seule main sont très courantes chez les **prestidigitateurs et les illusionnistes** dont la dextérité se situe nettement au-dessus de la moyenne, entretenue par des exercices quotidiens ;
- **La main gauche du violoniste** (Fig. 285) ou **celle du guitariste** réalise une prise-plus-action mobile : le pouce soutient le « manche » du violon et, tout en se déplaçant, sert de contre-appui à l'action des quatre autres doigts qui, en s'appliquant sur les cordes, forment les notes. Cette pression sur la corde doit à la fois être précise, ferme et modulée **pour créer le vibrato**. Ces actions complexes naissent d'un long apprentissage et doivent être entretenues par des exercices quotidiens.

Chaque lecteur peut découvrir par lui-même l'infinie variété des prises-plus-actions qui représentent l'activité la plus élaborée de la main en pleine possession de son intégrité fonctionnelle et peuvent servir de **tests fonctionnels**.

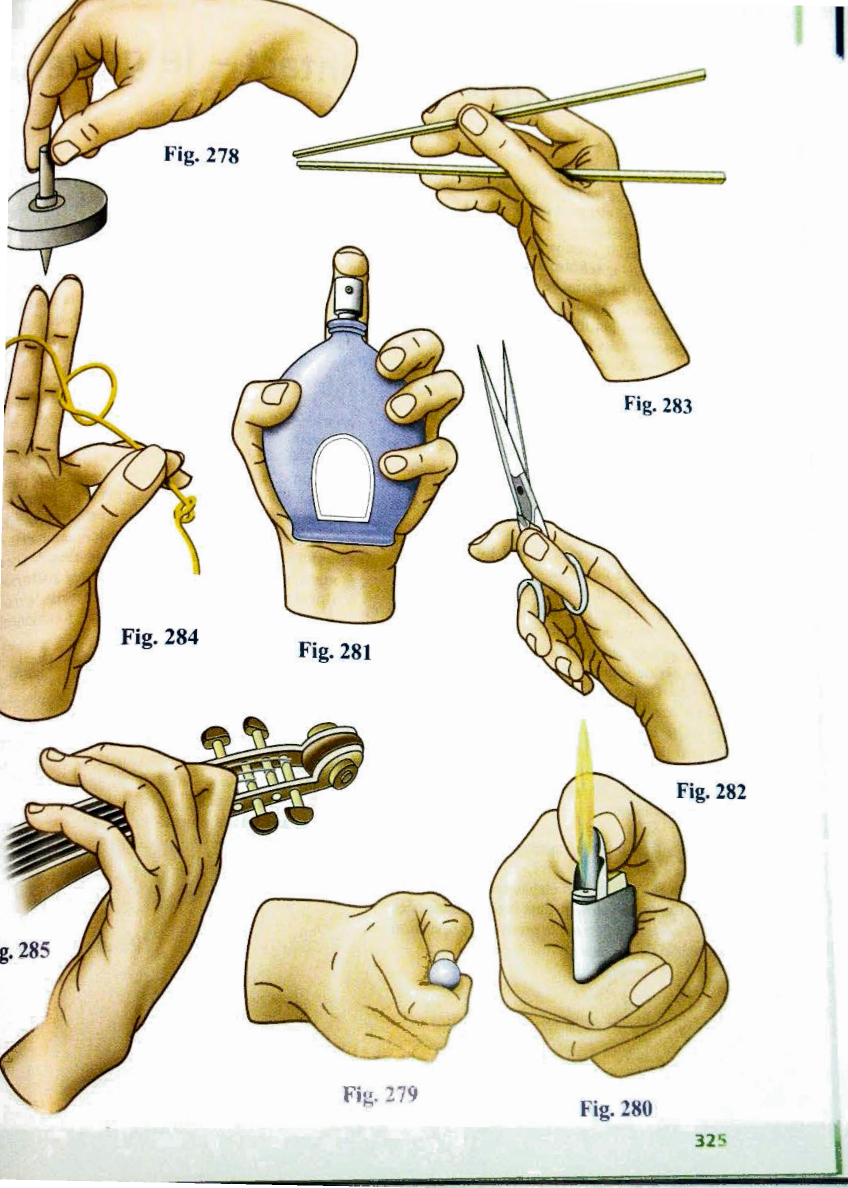


Fig. 278

Fig. 283

Fig. 284

Fig. 281

Fig. 282

g. 285

Fig. 279

Fig. 280

Les percussions – le contact – le geste

La main de l'homme est loin d'être utilisée seulement pour la préhension ; elle peut être utilisée comme **instrument de percussion** :

- Soit dans le travail, comme par exemple dans l'utilisation d'une **machine à écrire, à calculer** (Fig. 286) ou d'un **ordinateur**, ou bien encore pour **jouer du piano** : chaque doigt se comporte comme un petit marteau qui frappe la touche grâce à l'action coordonnée des *interossei* et des *flexores digitorum*, le *profondus* en particulier. La difficulté consiste à acquérir l'indépendance fonctionnelle des doigts entre eux et des mains entre elles, ce qui demande un apprentissage cérébral et musculaire et un entraînement permanent ;
- Soit dans la lutte où les **coups sont frappés par le poing** (Fig. 287) dans la boxe, par le bord cubital de la main ou par l'extrémité des doigts dans le karaté, ou bien encore la main largement étalée dans la vulgaire gifle.
- Soit claquer des doigts en faisant glisser violemment le majeur de l'extrémité à la base du pouce

Le contact offert par la main peut être très mesuré, comme dans **la caresse** (Fig. 288) qui joue un rôle primordial dans le contact social et surtout affectif. Il faut aussi noter qu'une sensibilité cutanée intacte est autant indispensable à la main qui caresse qu'à l'objet de la caresse. Dans certains cas, le contact des deux mains peut jouer un rôle thérapeutique dans l'imposition des mains qui peut même être « efficace » à distance. Enfin, le geste le plus banal de la vie quotidienne de l'homme occidental, la poignée de main (Fig. 289), représente un contact social chargé de signification symbolique.

L'expression gestuelle est un attribut irremplaçable de la main.

En effet, celle-ci s'effectue en étroite **coopération entre la face et la main** ; elle est sous la dépendance des centres sous-corticaux comme le prouve sa disparition dans la maladie de Parkinson.

Ce **langage de la main et de la face** est codifié pour la communication entre sourds-muets, mais **la gestuelle instinctive constitue un deuxième langage** ; à la différence avec le système de communication parlé, **sa signification est universelle**. Ce mode d'expression comprend des formes innombrables, qui peuvent subir quelques variantes régionales, mais sont en général comprises sur toute la surface de la planète, qu'il s'agisse du poing levé en signe de menace (Fig. 282), du salut la main largement ouverte en signe de paix, ou du **doigt pointé** (Fig. 290. Main de St. Thomas dans le *Retable d'Isenheim* de Mathias Grünewald) un signe d'accusation, ou bien encore des **applaudissements** en signe d'approbation. Cette gestuelle est « travaillée » professionnellement par les artistes de théâtre, mais elle est instinctive à l'homme de la rue de façon d'autant plus irrépressible qu'il est plus méridional. Son but est de souligner et d'accentuer le sens de l'expression mais souvent le geste se passe de parole et suffit à lui seul à exprimer les sentiments et les situations, ce qui explique la **grande abondance de la « main gestuelle » dans les œuvres picturales et sculpturales**. Ce rôle de la main n'est pas la moindre de ses fonctions à côté de son utilité fonctionnelle et sensorielle.

Dans certaines **activités, artisanales** par exemple comme **pour les mains de potier** (Fig. 291) l'action de la main se place sur tous les plans simultanément : rôle effecteur dans le modelage de l'objet, rôle sensoriel pour reconnaître sa forme qui se modifie en permanence sous sa caresse-travail et enfin signification symbolique, geste d'offrande de sa création à la collectivité des hommes.

C'est ce caractère complet du geste créatif de l'artisan qui en fait toute la valeur.

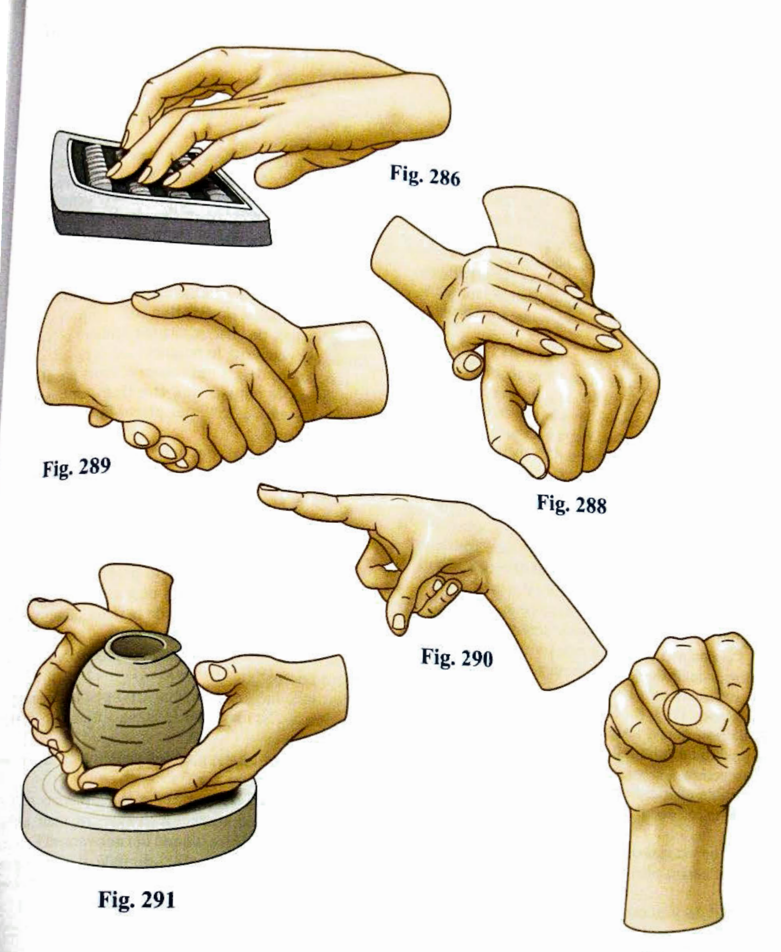


Fig. 286

Fig. 288

Fig. 289

Fig. 290

Fig. 291

Fig. 287

Positions de fonction et d'immobilisation

Décrite initialement en 1948 par S. Bunnel comme la position de la main au repos, la **position de fonction de la main** est en réalité bien différente de celle que l'on observe sur le sujet endormi (Fig. 292 La Main d'Adam, d'après Michel-Ange) encore dite **position de relâchement** ou **position de repos** qui est aussi la position antalgique d'une main blessée : avant-bras en pronation, poignet fléchi, pouce en adduction-rétroposition, commissure fermée, doigts relativement étendus en particulier au niveau des métacarpo-phalangiennes.

La **position de fonction** (Fig. 293 et 294) a été précisée en 1951 par W. Littler : avant-bras en semi-pronation, poignet en extension à 30° et adduction, qui place le pouce, particulièrement le premier métacarpien, dans l'alignement du radius, formant avec le deuxième métacarpien un angle d'environ 45°, métacarpo-phalangienne et inter-phalangienne presque en rectitude, doigts légèrement fléchis, les métacarpo-phalangiennes d'autant plus fléchies qu'il s'agit d'un doigt plus interne. Dans l'ensemble, la position de fonction **est celle à partir de laquelle la préhension pourrait s'effectuer avec le minimum de mobilité articulaire** si l'une ou plusieurs des articulations des doigts ou du pouce étaient ankylosées ou à partir de laquelle la récupération de mouvements utiles serait relativement facile, l'opposition étant déjà presque réalisée et quelques degrés de flexion dans l'une des articulations restantes, suffisants pour la compléter.

Cependant, en 1973, R. Tubiana (1973) a défini **trois types de positions d'immobilisation** :

1) **La position d'immobilisation temporaire** dites **de « protection »** (Fig. 295) qui cherche à préserver la mobilité ultérieure de la main :

- Avant-bras en demi-flexion, pronation, coude fléchi à 100° ;
- Poignet en extension à 20° et légère adduction ;
- Doigts d'autant plus fléchis qu'ils sont plus internes :
  - les MP fléchies entre 50 et 80°, d'autant plus que les IPP le seront moins ;
  - les IP très modérément fléchies, d'autant moins qu'on désire diminuer la tension et l'ischémie – le manque d'apport artériel – à leur niveau ;
  - pour les IPP entre 10 et 40°, pour les IPD entre 10 et 20°.
  - Pouce prêt à l'opposition : premier métacarpien en légère adduction mais aussi en antéposition assurant l'ouverture de la première commissure. MP et IP en très légère flexion de telle sorte que la pulpe du pouce se porte vers celle de l'index et du médius.

2) **Les positions d'immobilisation définitives fonctionnelles** dites **« de fixation »** :

Elles dépendent de chaque cas particulier :

- En ce qui concerne le poignet :
  - lorsque les doigts ont conservé leurs possibilités de prise, le poignet doit être fixé – arthrodésé – en extension à 25° pour placer la main en position de prise ;
  - lorsque les doigts ont perdu leur fonction de préhension, le blocage du poignet est plus avantageux en flexion ;
  - si les deux poignets sont immobilisés définitivement, il est impératif d'en bloquer un en flexion en vue de l'hygiène périnéale, l'usage d'une canne doit faire bloquer le poignet en rectitude. L'usage de deux cannes doit entraîner l'arthrodèse en extension à 10° de la main dominante et en flexion à 10°, de l'autre.
- L'avant-bras est immobilisé en pronation plus ou moins complète ;
- En ce qui concerne les métacarpo-phalangiennes, la position en flexion va de 35° pour l'index à 50° pour l'auriculaire ;
- Pour les inter-phalangiennes proximales la flexion s'échelonne de 40 à 60° ;
- L'arthrodèse de la trapézo-métacarpienne se fait dans une position adaptée à chaque cas, mais, à chaque fois que doit être bloqué définitivement l'un des éléments de la pince pollici-digitale, il est indispensable de tenir compte des possibilités de mouvement de la branche qui reste mobile.

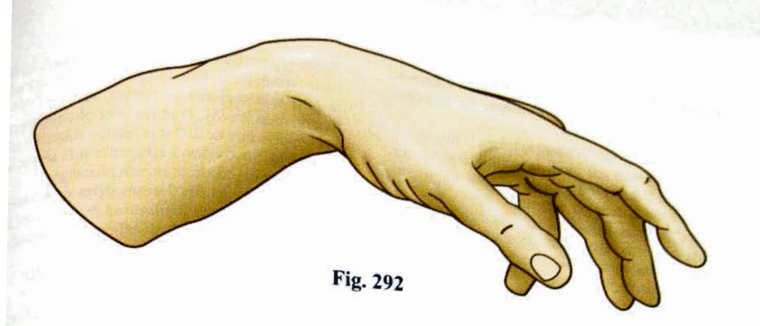


Fig. 292

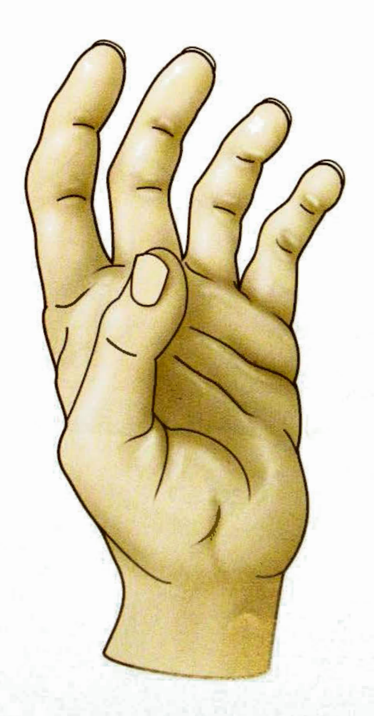


Fig. 293

3) Les positions non fonctionnelles dites « d'immobilisation temporaire » – Positions de relâchement partiel

Elles ne se justifient que pendant le temps le plus court possible pour obtenir une meilleure stabilité au niveau d'un foyer de fracture ou un relâchement au niveau d'une suture tendineuse ou nerveuse.

Le risque d'enraidissement par stase veineuse et lymphatique est sérieux. Il est considérablement diminué si les articulations voisines de celles immobilisées sont mobilisées activement :

- Après **suture nerveuse, du médian, du nerf ulnaire ou suture des fléchisseurs**, le poignet peut être fléchi jusqu'à 40° sans grandes conséquences pendant trois semaines, mais il est capital d'immobiliser les MP en flexion aux environs de 80°, les inter-phalangiennes restant dans leur degré naturel d'extension, car leur extension est difficile à récupérer après flexion forcée ;
- Après **réparation des éléments dorsaux**, les articulations doivent être immobilisées en extension mais il faut toujours conserver au moins 10° de flexion dans les MP. Pour les inter-phalangiennes la flexion peut être de 20° si la section siégeait au-dessus des MP, mais devra être nulle si la section siégeait au niveau de la première phalange ;
- Après **traitement des lésions dites « en boutonnière »**, l'IPP est immobilisée en extension et l'IPD en flexion afin d'attirer distalement l'appareil extenseur ;
- Inversement, **si la lésion siège près de l'IPD**, celle-ci est immobilisée en extension et l'IPP en flexion afin de relâcher les bandelettes latérales de l'extenseur.

Quelle que soit l'attitude il faut se souvenir qu'une immobilisation prolongée entraîne toujours une perte fonctionnelle. Elle doit donc être la plus brève possible.

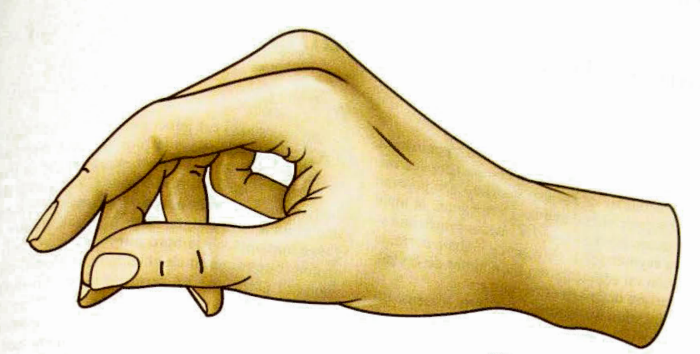


Fig. 294

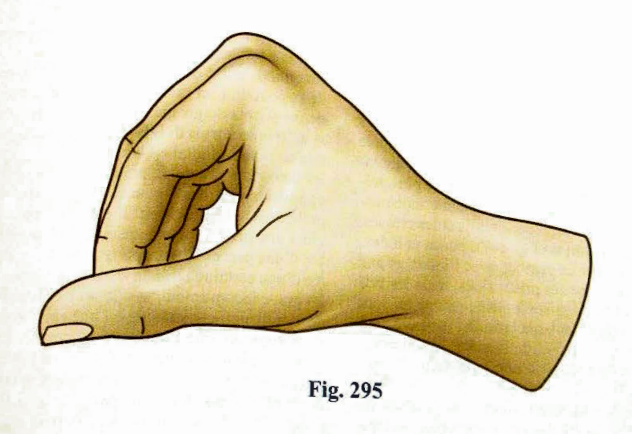


Fig. 295

Mains amputées et mains-fictions

Les **mains-fictions,** simple exercice d'imagination, permettent cependant de mieux comprendre les raisons architecturales de la main humaine. On pourrait en effet imaginer bien d'autres solutions que la main normale, mains asymétriques, ou mains symétriques.
Les **mains asymétriques** dérivent de la main normale par réduction ou augmentation du nombre de doigts, ou par inversion de la symétrie.

1) **L'augmentation du nombre de doigts,** sixième ou septième doigts ajoutés après l'auriculaire sur le bord cubital de la main augmenterait certes en théorie, la fermeté de la prise à pleine paume, mais au prix d'une complication fonctionnelle prohibitive, sans gain réel d'efficacité. Ces mains à doigts surnuméraires sont des malformations congénitales qui nécessitent leur amputation.
2) **La réduction du nombre de doigts à quatre ou trois** fait perdre des possibilités à la main. Certains singes d'Amérique Centrale possèdent au membre supérieur une main à quatre doigts sans pouce, uniquement capable de s'accrocher aux branches, alors qu'au membre inférieur ils ont une main à cinq doigts avec un pouce opposable. La **main à trois doigts** (Fig. 296), telle qu'on peut l'observer après certaines amputations, conserve les prises tridigitales et bidigitales, les plus fréquentes et les plus précises, mais perd la prise à pleine paume indispensable pour saisir les manches d'outils et les crosses. **La main à deux doigts** (Fig. 297), pouce et index, peut encore réaliser un crochet, avec l'index, et une pince bidigitale pour les prises fines, mais les prises tridigitales et les prises à pleine paume lui sont impossibles, et pourtant, quel résultat inespéré peut être chez certains mutilés de la main, la conservation ou la reconstitution d'une telle main à deux doigts !
3) Après des lésions de l'auriculaire – amputation finale pour Maladie de Dupuytren – ou de l'annulaire – dégantage par l'alliance dit aussi « doigt de bague » – les chirurgiens de la main peuvent être amenés à reconstituer une **main à quatre doigts**. Que ce soit après **résection du cinquième rayon** (Fig. 298) ou **résection inter-métacarpienne du quatrième rayon** (Fig. 299), le résultat esthétique et fonctionnel est généralement très satisfaisant, et cette infirmité passe le plus souvent inaperçue des gens non avertis. Qui a remarqué que la main de Mickey (Fig. 300) ne comporte que quatre doigts !

Imaginons une **main à symétrie inverse**, c'est-à-dire une **main à cinq doigts, mais à pouce ulnaire**, c'est-à-dire implanté sur le bord interne de la main... Cette anatomie entraînerait un changement d'obliquité de la gouttière palmaire : en position de prono-supination neutre, le manche d'un marteau, au lieu d'être oblique vers le haut, le serait vers le bas ce qui empêcherait de frapper sur un clou de haut en bas à moins que la position neutre de prono-supination soit affectée de + 180°, la paume regardant alors en dehors ! L'ulna passerait ainsi au-dessus du radius et l'insertion du biceps sur cet os deviendrait inefficace. Au total, c'est toute l'architecture du membre supérieur qui devrait être modifiée sans avantage fonctionnel évident. Cette démonstration *ab absurdo* justifie donc pleinement le pouce à implantation radiale !
Imaginons enfin des **mains symétriques**, comportant deux pouces, l'un radial, l'autre ulnaire encadrant un, deux ou trois doigts médians. La plus simple, la **main symétrique à trois doigts** (Fig. 301) peut réaliser deux pinces pollici-digitales, une pince bi-polliciste (entre les deux pouces) et une prise tridigitale (Fig. 302) par opposition des deux pouces sur l'index, soit quatre préhensions de précision. Il est aussi possible d'imaginer une prise à « pleine paume » entre les deux pouces d'une part et, d'autre part, la paume et l'index. Dotée d'une certaine fermeté, cette prise aurait cependant un grave inconvénient, sa symétrie rendant le manche de l'outil perpendiculaire à l'axe de l'avant-bras ; or nous avons vu que l'obliquité du manche combinée à la prono-supination permet d'orienter l'outil. Il en serait de même pour toutes les **mains symétriques à deux ou à trois doigts médians** (Fig. 303) soit cinq doigts dont deux pouces. Les perroquets possèdent deux doigts postérieurs réalisant une griffe symétrique leur permettant de se tenir fermement sur une branche, mais ce n'est pas notre problème ! Une autre conséquence de la main à deux pouces serait la structure symétrique de l'avant-bras. Dans ces conditions, qu'adviendrait-il de la prono-supination ?

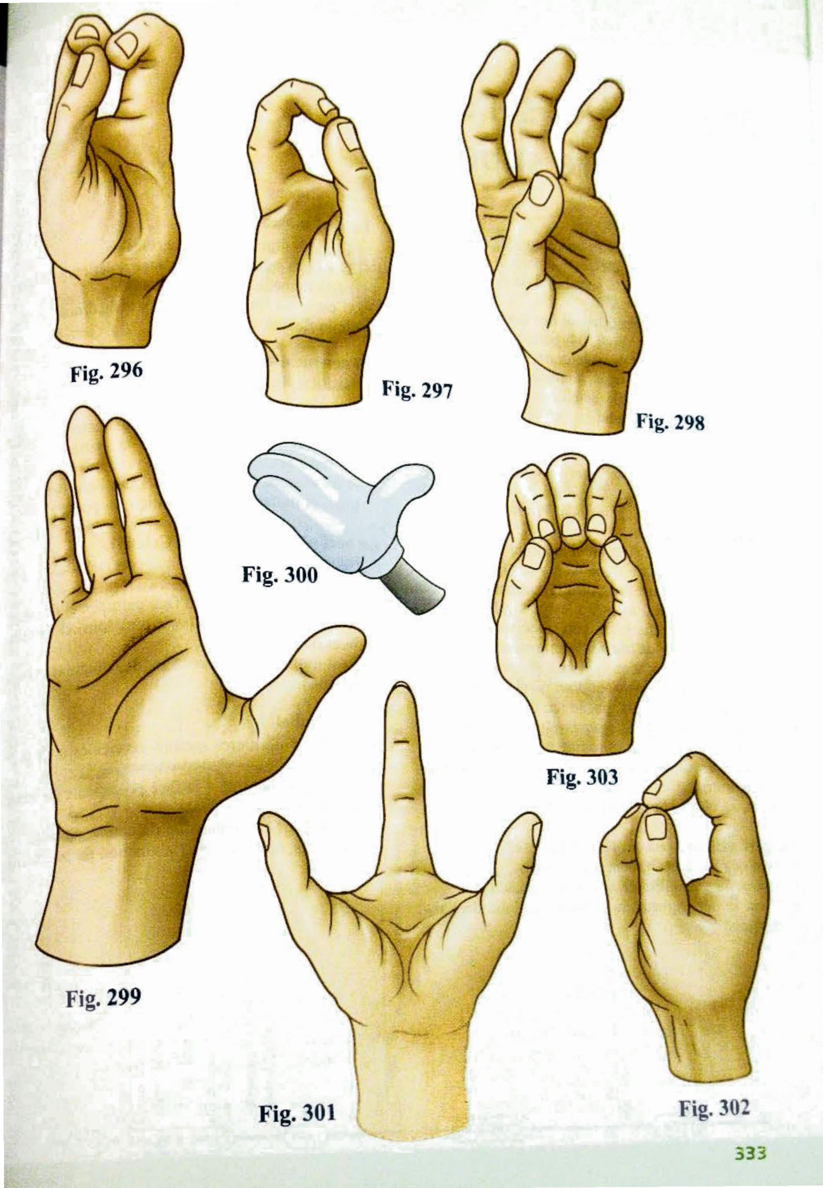


Fig. 296

Fig. 297

Fig. 298

Fig. 299

Fig. 300

Fig. 301

Fig. 302

Fig. 303

Motricité et sensibilité du membre supérieur

Cette page se veut un aide-mémoire des notions neurologiques indispensables concernant la motricité du membre supérieur, et la sensibilité de la main.

Un **grand tableau synoptique des nerfs moteurs du membre supérieur** (Fig. 304) permet de retrouver le ou les nerfs moteurs de chacun des muscles désignés par leur nom de la Nomenclature Internationale.
Il n'est pas question de détailler ce tableau : il faut l'examiner soigneusement et s'en pénétrer, en reconnaissant le partage des territoires, les doubles innervations, et aussi les anastomoses entre les grands troncs nerveux qui peuvent expliquer les constatations paradoxales de certains signes déficitaires ou des résultats aberrants de certains examens électrologiques. Il faut se faire une image de ces échanges de fibres nerveuses, comme celle d'un réseau d'autoroutes dans lequel des voitures sortent de l'une pour s'engager dans une autre, en empruntant des voies d'interconnexion : en définitive, le point d'arrivée n'est pas celui du tronc du nerf d'origine, mais celui du tronc voisin : arriver à Bordeaux au lieu de Marseille, en prenant une transversale à partir de Mâcon… Il faut savoir aussi qu'un grand tronc nerveux provient d'un nombre variable de racines cervicales et que, par le jeu des anastomoses, des fibres provenant de racines étrangères au tronc considéré, peuvent ainsi se terminer dans un territoire imprévu. Les variations sont innombrables et imprévisibles, autour d'un schéma moyen, qui, fort heureusement, se vérifie la plupart du temps.

Le nerf axillaire (ancien N. Circonflexe)
- Issu des 5 – 6 et 7e racines cervicales.
- Donne la sensibilité de la région deltoïdienne.
- C'est le nerf moteur du *deltoïdeus*, donc de l'abduction.

Le nerf musculo-cutané
- Issu des 5 et 6e racines cervicales.
- Donne la sensibilité de la face antérieure du bras et partiellement de l'avant-bras.
- C'est le nerf moteur du *biceps* et du *brachialis*, donc de la flexion du coude.

Le nerf médian
- Issu des 4 dernières racines cervicales et de la 1re dorsale.
- Donne la sensibilité à la face palmaire de la main aux doigts (voir plus loin) et partiellement de l'avant-bras.
- Il est moteur des fléchisseurs des doigts et du poignet, et moteur de l'opposition du pouce.

Le nerf ulnaire (ancien N. Cubital)
- Issu des 4 dernières racines cervicales et de la 1re dorsale.
- Donne la sensibilité à la face palmaire et dorsale de la main et des doigts (voir plus loin) et partiellement de l'avant-bras.
- Il est moteur des interosseux des doigts et des thénariens internes.

Le nerf radial
- Issu des 4 dernières racines cervicales et de la 1re dorsale.
- Donne la sensibilité à la face postérieure du bras et de l'avant-bras.
- C'est le nerf de l'extension du coude, du poignet et des doigts, ainsi que de l'abduction du pouce.

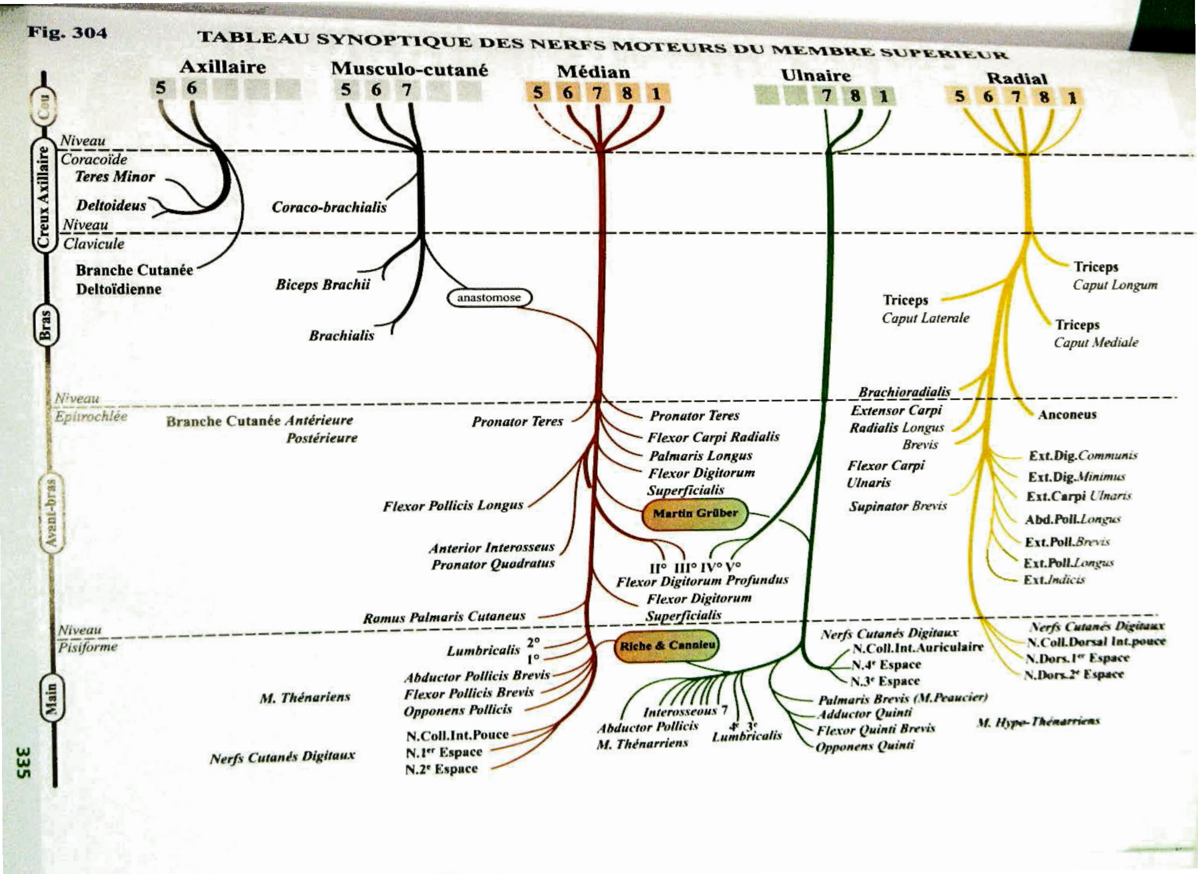


Fig. 304
TABLEAU SYNOPTIQUE DES NERFS MOTEURS DU MEMBRE SUPERIEUR
Axillaire
5 6
Musculo-cutané
5 6 7
Médian
5 6 7 8 1
Ulnaire
7 8 1
Radial
5 6 7 8 1
Cou
Creux Axillaire
Bras
Avant-bras
Main
Niveau
Coracoïde
Teres Minor
Deltoideus
Niveau
Clavicule
Branche Cutanée
Deltoïdienne
Coraco-brachialis
Biceps Brachii
Brachialis
anastomose
Triceps
Caput Longum
Triceps
Caput Laterale
Triceps
Caput Mediale
Niveau
Epitrochlée
Branche Cutanée Antérieure
Postérieure
Pronator Teres
Pronator Teres
Flexor Carpi Radialis
Palmaris Longus
Flexor Digitorum
Superficialis
Brachioradialis
Extensor Carpi
Radialis Longus
Brevis
Anconeus
Flexor Carpi
Ulnaris
Supinator Brevis
Ext.Dig.Communis
Ext.Dig.Minimus
Ext.Carpi Ulnaris
Abd.Poll.Longus
Ext.Poll.Brevis
Ext.Poll.Longus
Ext.Indicis
Flexor Pollicis Longus
Martin Grüber
Anterior Interosseus
Pronator Quadratus
II° III° IV° V°
Flexor Digitorum Profundus
Flexor Digitorum
Superficialis
Ramus Palmaris Cutaneus
Niveau
Pisiforme
Lumbricalis 2° 1°
Riche & Cannieu
Nerfs Cutanés Digitaux
N.Coll.Int.Auriculaire
N.4e Espace
N.3e Espace
Nerfs Cutanés Digitaux
N.Coll.Dorsal Int.pouce
N.Dors.1er Espace
N.Dors.2e Espace
Abductor Pollicis Brevis
Flexor Pollicis Brevis
Opponens Pollicis
M. Thénariens
Interosseous 7
Abductor Pollicis
M. Thénarriens
4e 3e
Lumbricalis
Palmaris Brevis (M.Peaucier)
Adductor Quinti
Flexor Quinti Brevis
Opponens Quinti
M. Hypo-Thénarriens
N.Coll.Int.Pouce
N.1er Espace
N.2e Espace
Nerfs Cutanés Digitaux

Tests moteurs et territoires sensitifs du membre supérieur

La pulpe des doigts

Les tests d'activité des principaux nerfs moteurs permettent de déterminer si un tronc nerveux est interrompu ou paralysé :

- **Le test du nerf médian** (Fig. 305) consiste dans la fermeture du poing ;
- **Le test du nerf ulnaire** consiste dans l'écartement (Fig. 306) et le rapprochement (Fig. 307) des doigts en extension ;
- **Le test du nerf radial** (Fig. 308) consiste dans l'extension active du poignet, l'extension et l'écartement du pouce. À noter que seules les M.P. des doigts sont étendues : les I.P. restent fléchies et ne s'étendent, incomplètement d'ailleurs, que dans la flexion du poignet ;
- **Le test du nerf radial, associé au nerf ulnaire** (Fig. 309), varie du précédent justement par la possibilité d'étendre simultanément les inter-phalangiennes.

Les territoires sensitifs de la main doivent être connus parfaitement afin d'affiner le diagnostic de déficit nerveux :

- Pas de problème pour la *face palmaire* (Fig. 310) : le nerf médian en dehors (rose), et le nerf ulnaire en dedans (vert) se partagent cette face suivant une ligne droite qui passe exactement par le milieu du quatrième rayon ;
- C'est plus compliqué pour la *face dorsale* (Fig. 311), innervé par *trois nerfs* :
  - En dehors, le nerf radial (en jaune) ;
  - En dedans, le nerf ulnaire (en vert) La frontière entre les deux territoires passe sur l'axe de la main, c'est-à-dire le troisième rayon ;
  - À noter cependant que seules les faces dorsales des premières phalanges et du premier métacarpien sont concernées ;
  - La face dorsale des deux dernières phalanges est innervée par les deux nerfs palmaires : nerf médian (rose) en dehors de l'axe de l'annulaire et nerf ulnaire (vert) en dedans de cette frontière.

Au total, les deux dernières phalanges ont une sensibilité relevant :

- Du médian pour le pouce, l'index et le majeur ;
- Du nerf ulnaire pour l'auriculaire ;
- Pour l'annulaire, sa moitié externe relève du médian et sa moitié interne du nerf ulnaire.

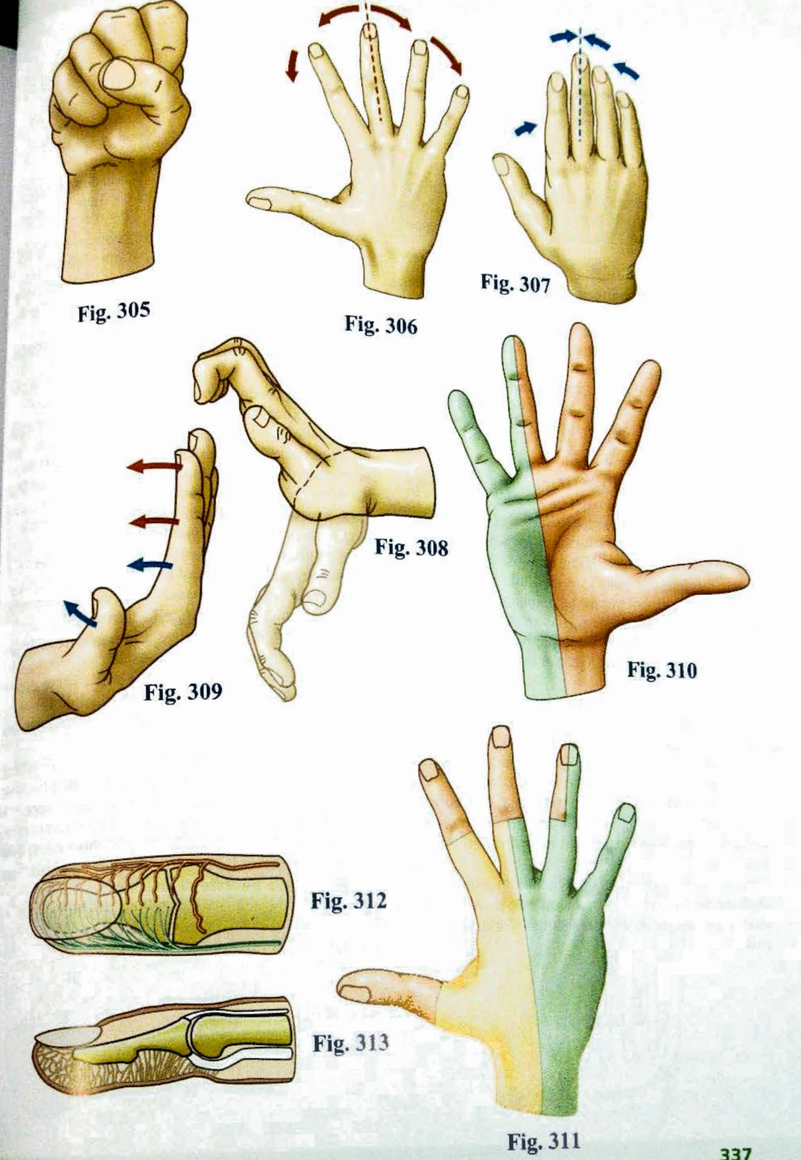
Il ne faut pas oublier que la main, et particulièrement les pulpes sont *richement vascularisées et innervées*, car la main est **l'organe récepteur principal** de l'un des cinq sens : **le toucher**. De ce fait, elle correspond à des aires corticales cérébrales très étendues, aussi bien motrices que sensitives.

La vascularisation de la pulpe digitale (Fig. 312) est assurée par *les deux artères collatérales du doigt* (une seule est figurée en rouge). Elles communiquent par un riche réseau pulpaire et par des anastomoses transversales, encadrant chacune des articulations.

Le réseau nerveux (Fig. 312) est constitué par les très riches ramifications des deux nerfs collatéraux (un seul, il est figuré en vert).

Quant à **la pulpe** elle-même (Fig. 313), elle est constituée d'un tissu très spécialisé, de structure alvéolaire, dont les fibres conjonctives s'attachent d'une part sur le périoste de la phalangette, d'autre part à la face profonde du derme digital. Cette structure lui confère souplesse, élasticité et résistance mécanique, qualités indispensables pour le contact lors des prises ainsi que pour la sensibilité. La pulpe est soutenue à son extrémité par la *tablette unguéale* qui joue un rôle essentiel dans sa qualité fonctionnelle.

Les pulpes sont des trésors pour les artisans et les artistes, pianistes et violonistes : un simple panaris peut les endommager et les rendre définitivement inutilisables.


Fig. 305
Fig. 306
Fig. 307
Fig. 308
Fig. 309
Fig. 310
Fig. 311
Fig. 312
Fig. 313

Trois tests moteurs de la main

Outre les tests moteurs détaillés dans les pages précédentes, **trois tests pour le nerf ulnaire** méritent d'être signalés. Deux sont classiques, le troisième est nouveau.

1) **Le signe de Wartenberg** (Fig. 314) s'observe dans les paralysies ulnaires globales, mais il est surtout intéressant pour reconnaître les paralysies basses du nerf, par exemple au niveau du canal de Guyon. L'attention peut être attirée par l'écartement permanent de l'auriculaire par rapport à l'annulaire (flèche noire). Le rapprochement actif, volontaire, de l'auriculaire vers le doigt voisin (en arrière-plan) est impossible.

2) **Le signe de Froment** (Fig. 315) s'apprécie lorsqu'on demande au sujet de serrer une feuille de papier entre pouce et index : l'index et le pouce affectent normalement la forme d'un anneau (en arrière-plan). En cas de déficit ulnaire, la pince perd de sa fermeté par paralysie de l'adductor pollicis brevis, innervé par la branche palmaire profonde du nerf ulnaire ; la première phalange du pour bascule en extension et si l'on tire le papier, il échappe de la prise, ce qui n'est pas le cas si le nerf est normal.

3) **Le signe du crochet ulnaire défaillant** (décrit récemment par l'auteur). Normalement, lorsqu'on fléchit fortement les deux derniers doigts dans la paume, il est impossible à l'examinateur de « décrocheter » l'auriculaire, c'est-à-dire d'obtenir l'extension passive de la dernière phalange de l'auriculaire du patient. Voici comment ce test est recherché, par exemple sur la main droite d'un patient (Fig. 316) :

- L'examinateur (deux mains) présente son index droit au patient, et lui demande de le serrer à l'intérieur de ses deux derniers doigts fortement fléchis.
- L'examinateur tente alors, à l'aide de son index gauche, d'allonger de force la dernière phalange de l'auriculaire du patient.
- Normalement, cette tentative échoue : les deux derniers doigts en crochet du patient résistent
- En cas de paralysie ulnaire, le crochet de l'auriculaire du patient cède et sa troisième phalange bascule en extension (flèche noire).

La même épreuve peut être appliquée à l'annulaire avec le même résultat.

Quel est le mécanisme de ce trouble ?

Il faut se souvenir que la commande du *flexor digitorum profondus* est composite (Fig. 317) : les deux chefs externes (rose), destines à l'index et au majeur sont innervés par une branche **2** du nerf médian **M,** et les deux chefs internes pour l'auriculaire et l'annulaire sont commandés par une branche **1** qui se détache du nerf ulnaire **U** au-dessous du coude.

Ceci explique la paralysie sélective de la flexion de l'annulaire et de l'auriculaire en cas de paralysie ulnaire, mais point intéressant, c'est que la positivité de ce test dépend du niveau de l'interruption du nerf :

- Si cette interruption siège à la partie haute au-dessus du point **a,** le test est **positif**.
- Si cette interruption siège à la partie basse au point **b**, ou au-dessous, au niveau du canal de Guyon par exemple, le test est **négatif**, alors que le Test de Froment est positif.

Voici donc un test facile à rechercher et très sélectif, devant faire partie de tout examen neurologique complet du membre supérieur. On peut aussi l'appeler le **test de la lime à ongle**, car il a été découvert chez une patiente qui se plaignait de ne plus pouvoir se limer l'ongle de l'auriculaire, car son doigt basculait en extension sous la poussée de la lime.

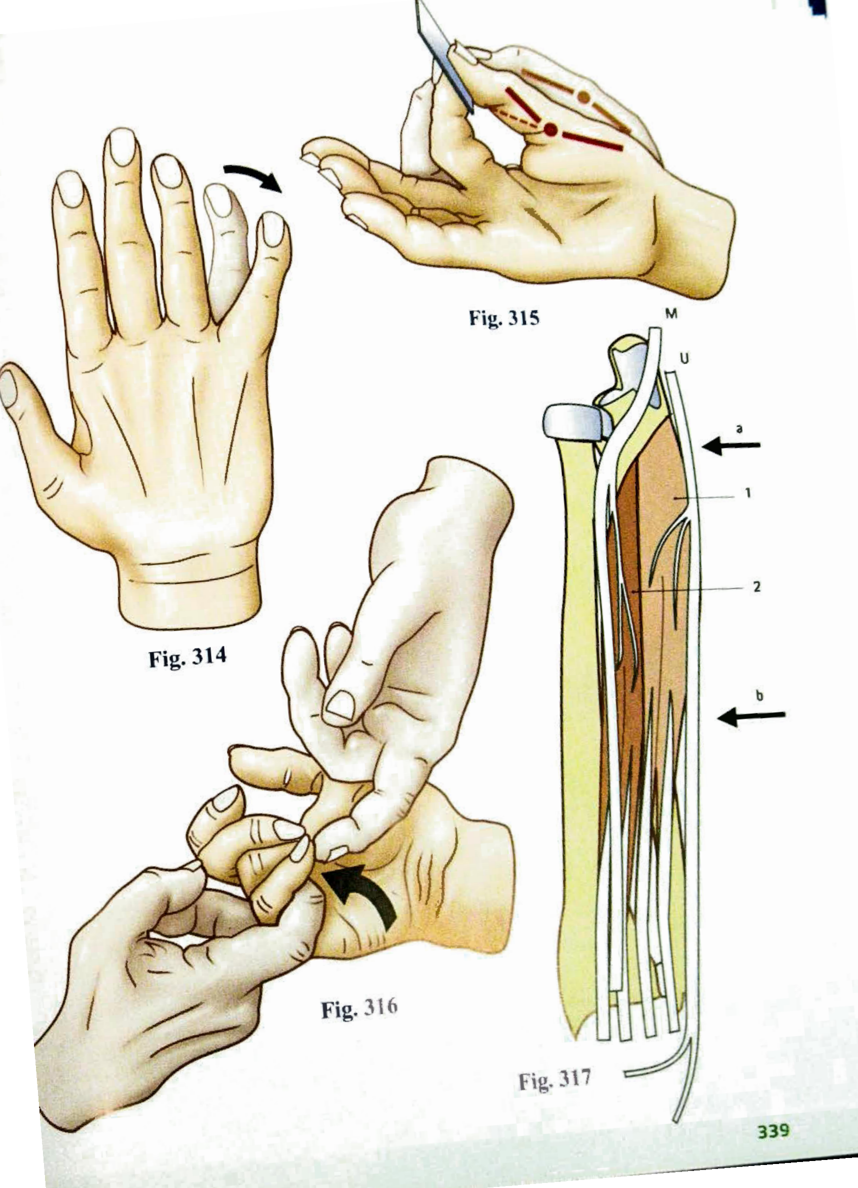


Fig. 314

Fig. 315

Fig. 316

Fig. 317

La main de l'homme

Depuis la Préhistoire (Fig. 318), la Main de l'Homme n'a pas changé, comme en témoigne cette empreinte négative de main laissée, sans doute en guise de signature, par un de nos ancêtres lointains et artiste sur la paroi d'une caverne.
Les singes possèdent aussi une main semblable à la nôtre, avec un pouce opposable, mais ce qui fait la différence, c'est le mode d'utilisation de la main, commandée par le cerveau, avec lequel elle forme un couple indissociable.
Ce **couple main/cerveau** fonctionne dans les deux sens : il existe une relation de « réciprocité ». C'est grâce aux capacités de la main que le cerveau humain a pu progresser.

Dans sa structure complexe, elle se révèle donc parfaitement logique et adaptée à ses différentes fonctions. Son architecture reflète le principe d'Économie Universelle, cher à Guillaume d'Occam*. C'est une des plus belles réussites de l'**Évolution Créatrice**.
L'Homme poussé par ses ambitions prométhéennes réalise déjà des organes robotiques de préhension et de manipulation, mais il est encore loin d'avoir atteint le degré de perfection de son modèle.

* ***Guillaume d'Occam*** (1285-1349), Franciscain à Oxford puis à Paris, rendu célèbre par son aphorisme, connu sous le nom du « Rasoir d'Occam », qui s'énonce : La beauté d'une théorie se mesure à sa simplicité.
« Entia non sunt multiplicanda sine necessitate » : On ne doit pas multiplier les entités sans nécessité.
Encore connu sous le nom de *Principe d'Économie Universelle*.
Philosophe et théologien, il finit excommunié et mourut de la Grande Peste.



Index

F

G

H

I-J-K

L

M

N-O

U-V

X-Z

Bibliographie

Barnett C.H., Davies D.V. & Mac Conaill M.A. ; *Synovial Joints. Their structure and mechanics*. C.C. THOMAS, Springfield U.S.A., 1961

Barnier L. ; *L'analyse des mouvements*. P.U.F. Paris, 1950

Basmajian J.V. ; *Muscles alive. Their function revealed by electromyography*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1962

Bausenhardt ; Uber das carpometacarpalgelenk des Daumens. *Zeitschr. Anat. Entw. Gesch. Bd*, 114-251, 1949

Berger R.A., Blair W.F., Crowninshield P.D., Flatt E.A. ; The scapholunate ligament. *J. Hand Surg. Am*, 7 (1), 87, 1982

Bonola A., Caroli A., Celle L. ; *La Main*. Ed. Française Piccin Nova Libraria Padoue, 1988. (Selle trapezienne p.175)

Bridgeman G.B. ; *The Human Machine. The anatomical structure and mechanism of the huma body*. 1 Vol., 143p., Dover Publications Inc., New York, 1939

Bunnell S. ; *Surgery of the hand*. Lippincott, Philadelphia, Ed.1., 1944., Ed.5 revised by Boyes, 1970

Bunnell S. ; *Surgery of the hand*. J-B. Lippincott, Philadelphia, 1944

Caffinière J.Y. (de la) ; L'articulation trapézo-métacarpienne, approche biomécanique et appareil ligamentaire. *Arch. d'Anat. Path*, 18 : 277-284, 1970

Caffinière J.Y. (de la) ; Anatomie fonctionnelle de la poulie proximale des doigts. *Arch. d'Anat. Path*, 19 : 35, 1971

Caffinière J.Y. (de la), Mazas F., Mazas Y., Pelisse F. et Present D. ; Prothèse totale d'épaule, bases expérimentales et premiers résultats cliniques. Vol. IV, n° 5, Éditions INSERM, Paris, 1975

Caffinière J. Y (de la) et Pineau H. ; Approche biomécanique et cotation des mouvements du premier métacarpien. *Rev. Chir. Orthop.*, 1971, 57(1), 3-12

Caffinière J.Y. (de la) et Hamonet C. ; Secteurs d'activité des muscles thénariens *in Traité de Chirurgie de la Main*, Tome I par Raoul Tubiana

Camus E.J., Millot F., Larivière J., Raoult S., Rtaimate M. ; Kinematics of the wrist using 2D and 3D analysis : biomechanical and clinical deductions. *Surg. Radiol. Anat.*, 2004, 26, 399-410

Cardano Gerolamo, mathématicien italien (1501-1576) ; à propos du Cardan. Voir sur Internet

Chèze L., Doriot N., Eckert M., Rumelhart C., et Comtet J-J. ; Étude cinématique in vivo de l'articulation trapézo-métacarpienne. *Chir. Main*, 2001, 20, 23-30

Colville J., Callison J.R., White W.L. ; Role of mesotendon in tendon blood supply. *Plat. Reconstr. Surg.*, 43, 53, 1969

Comtet J.J. & Auffray Y. ; Physiologie des muscles élévateurs de l'épaule. *Rev. Chir. Ortho.*, 1970, 56(3), 105-117

CooneyW. P. & Chao E.Y.S. ; Biomechanical analysis of static forces in the thumb during hand function. *J. Bone and Joint*, S 59 A, 1, 27, 1977

Dautry P. & Gosset J ; À propos de la rupture de la coiffe des rotateurs de l'épaule. *Rev. Chir. Ortho.*, 1969, 55, 2, 157

Descamps L ; *Le jeu de la hanche*. Thèse, Paris, 1950.

Djbay H.C. ; L'humérus dans la prono-supination. *Rev. Méd. Limoges*, 1972, 3, 3, 147-150

Dobyns J.H., Linscheid R.L., Chao E.Y.S. & al. ; Traumatic instability of the wrist. Am. Acad. Orthop. *Surgeons Instruction Course Lect*, 24 : 182, 1975

Dubousset J. ; Les phénomènes de rotation lors de la préhension au niveau des doigts (sauf le pouce). *Ann. Chir.*, 1971, 25(19-20), C. 935-944

Duchenne (de Boulogne) G.B.A. ; *Physiologie des mouvements*, 1 Vol., 872p., J-B. Ballière et Fils, Paris, 1867 (épuisé). Fac similé : Hors commerce édité par les Annales de Médecine Physique, 1967

Duchenne (de Boulogne) G.B.A ; *Physiology of motion*, translated by E.B. KAPLAN, 1949. W.B. Saunders Co, Philadelphia and London

Duparc J., Caffinière J. Y (de la) et Pineau H. ; Approche biomécanique et cotation des mouvements du premier métacarpien. *Rev. Chir. Orthop.*, 1971, 57(1), 3-12

Essex-Lopresti P. ; Fractures of the radial head with distal radio-ulnar dislocation. *J. Bone and Joint Surg.* 1951, 33B, 244-247

Eyler D.L., Markee J.E. ; The anatomy and function of the intrinsic muculature of the fingers. *J. Bone and Joint Surg.*, 36A, 1-9, 1954

Fahrer M. ; Considérations sur l'anatomie fonctionnelle du muscle fléchisseur commun profond des doigts. *Ann. Chir.*, 1971 : 25, 945-950

Fahrer M. ; Considérations sur les insertions d'origine des muscles lombricaux : les systèmes digastriques de la main. *Ann. Chir.*, 1975 : 29, 979-982

Fick R. ; *Handbuchder Anatomie und Mechanik der Gelenke* – 3. Teil Iena Gustav Fischer, 1911

Fischer O. ; *Kinematik orhanischer Gelenke*. Braunsschweig, F. Vierweg und Sohn, 1907

Fischer L.P., Noireclerc J.A., Neidart J.M., Spay G. et Comtet J.J. ; Étude anatomoradiologique de l'importance des différents ligaments dans la contention verticale de la tête de l'humérus. *Lyon. Méd.*, 1970, 223, 11, 629-633

Fischer L.P., Carret J.P., Gonon G.P., Dimmet J. ; Étude cinématique des mouvements de l'articulation scapulo-humérale. *Rev. Chir. Orth.*, 1977, Suppl. 11, 63, 108-112

Froment J. ; Paralysie des muscles de la main et troubles de la préhension. *J. Méd. Lyon*, 1920

Froment J. ; La paralysie de l'adducteur du pouce et le signe de la préhension. *Rev. Neurol.*, 28 : 1236, 1914-1915

Galeazzi R. ; Di una particolare sindrome traumatica dello scheletro dell'avanbarchio. *Atti Mem Soc. Lombardi Chir.*, 1934 : **2**, 12

Gauss Karl Friedrich, mathématicien allemand (1777-1855) ; *La géométrie non euclidienne* (à propos du paradoxe de Codmann). Voir sur Internet

Ghyka Matila C. ; *Le Nombre d'Or*, 1 vol., 190p., Gallimard, Paris, 1978

Gilula L.A., Yin Y. ; *Imaging of the wrist and the hand*. Saunders Ed., Philadelphia, 1996

Gilula L.A., Weeks P.M. ; Post traumatic ligamentous instability of the wrist. *Radiology*, 126 : 641, 1978

Hamonet C., De la Caffinière J.Y., Opsomer G. ; Mouvements du pouce : détermination électromyographique des secteurs d'activité des muscles thénariens. *Arch. Anat. Path.*, 20(4), 363-367, 1972

Hamonet C., Valentin P. ; Étude électromyographique du rôle de l'opposant du pouce (*opponens pollicis*) et de l'adducteur du pouce (*adductor pollicis*). *Rev. Chir. Ortho.*, 1970, 56(2), 165-176

Henke J. ; *Die Bewegungen der Hanwurzel. Zeitschrift für rationelle Medizine*. Zürich, 1859, 7, 27

Henke W. ; *Handbuch der anatomie und mechanik der gelenke*. C.F. Wintersche Verlashandlung, Heidelberg, 1863

Hume M.C., Grellman H., Mc Kellop H., Brumfield R.H. Jr ; Functional range of motion of the joint of the hand. *J. Hand Surg.*, 1990 : 15A : 240-243

Inman-Vernet T. et coll.; Observations on the function of the shoulder joint. *J. Bone Joint Surg.*, 1944, 26, 1, 30

Kapandji A.I.; Cotation clinique de l'opposition et de la contre opposition du pouce. *Ann. Chir. Main*, 1986, 5(1), 67-73

Kapandji I.A.; La flexion-pronation de l'interphalangienne du pouce. *Ann. Chir.*, 1976, 30, 11-12, 855-857

Kapandji I.A.; Pourquoi l'avant-bras comporte-t-il deux os? *Ann. Chir.*, 1975, 29(5), 463-470

Kapandji I.A.; Le membre supérieur, support logistique de la main. *Ann. Chir.*, 1977, 31(12), 1021-1030

Kapandji I.A.; La radio-cubitale inférieure vue sous l'angle de la prono-supination. *Ann. Chir.*, 1977, 31(12), 1031-1039

Kapandji I.A.; La rotation du pouce sur son axe longitudinal lors de l'opposition. Étude géométrique et mécanique de la trapézo-métacarpienne. Modèle mécanique de la main. *Rev. Chir. Orthop.*, 1972, 58(4), 273-289

Kapandji A.I.; Anatomie fonctionnelle et biomécanique de la métacarpo-phalangienne du pouce. *Ann. Chir.*, 1981, 35(4), 261-267

Kapandji I.A. & Moatti E.; La radiographie spécifique de la trapézo-métacarpienne, sa technique, son intérêt. *Ann. Chir.*, 1980, 34, 719-726

Kapandji A. I, Kapandji T.G.; Nouvelles données radiologiques sur la trapézo-métacarpienne - Résultats sur 330 dossiers. *Ann. Chir. Main*, 1993, 4, 263-274

Kapandji A.I.; Biomécanique du carpe et du poignet. *Ann. Chir. Main*, 1987, 6, 147-169

Kapandji A.I.; Proposition pour une cotation clinique de la flexion-extension des doigts longs. *Ann. Chir. Main*, 1987, 6, 288-294

Kapandji A.I.; La préhension dans la main humaine. *Ann. Chir. Main*, 1989, 8, 234-241

Kapandji A.I.; La Biomécanique « Patate ». *Ann. Chir. Main*, 1987, 5, 260-263

Kapandji A.I.; Vous avez dit Biomécanique? La Mécanique « Floue » ou « Patate » « Maîtrise Orthopédique » n° 64, 1997, p. 1-4-5-6-7-8-9-10-11

Kapandji A.I., Martin-Boyer Y., Verdeille S.; Étude du carpe au scanner à trois dimensions sous contrainte de prono-supination. *Ann. Chir. Main*, 1991, 10, 36-47

Kapandji A.I.; De la phylogénèse à la fonction du membre supérieur de l'Homme (Conférence à Saint-Maurice). *Sport Med*, mars-avril 1996, n° 80-81, p. 4-9

Kapandji A.I.; La défaillance du crochet ulnaire ou encore « signe de la lime à ongles », signe peu connu d'atteinte du nerf ulnaire. *Ann. Chir. Main*, 1999, 18, 4, 295-298

Kapandji A.I.; La Main dans l'Art Main *in Traité de Chirurgie de la Main* par Raoul Tubiana, Ed. Masson, 1980

Kaplan E.B.; *Functional and surgical anatomy of the hand.* Ed. 1, 1953, Ed. 2, Philadelphia Lippincott, 1965

Kauer J.M.G.; Functional anatomy of the wrist. *Clin. Orthop.*, 149: 9, 1980

Kauer J.M.G.; The interdependence of the carpal articulation chains. *Acta Anat.*, 88: 481, 1974

Kuckzinski K.; *The Upper Limb in « A companion of medical studies ».* Vol. 1, Ch. 22, Ed. Passmore, J.S. Robson. Blackwell Scientific Publications, 1968

Kuckzinski K.; Carpometacarpal joint of the human thumb. *J. Anat.*, 118, 1, 119-126, 1974

Kuhlmann N.; Les mécanismes de l'articulation du poignet. *Ann. Chir.*, 1979, 33, 711-719

Kuhlmann N., Gallaire M., Pineau H.; Déplacements du scaphoïde et du semi-lunaire au cours des mouvements du poignet. *Ann. Chir.*, 1978, 38, 543-553

Landsmeer J.M.F.; The anatomy of the dorsal aponeurosis of the human finger and its functional significance. *Anat. Rec.*, 104, 31, 1949

Landsmeer J.M.F.; Anatomical and functional Investigations on the Articulations of the Human Fingers. *Acts Anat.*, 1955, 25, suppl. 24

Landsmeer J.M.F.; Studies in the anatomy of articulations: I) the equilibrium of the intercalated bone, II) Patterns of movement of bimuscular biarticular systems. *Acta morph. neer. scandinav.*, 3, 287-321

Landsmeer J.M.F.; A report on the coordination of the interphalangeal joints of the human finger and its disturbances. *Acta morph. neerl scand.*, 1953, 2, 59-84

Landsmeer J.M.F.; Studies in the anatomy of articulations. 1) The equilibrium of the intercalated bone; 2) Paterns of movements of bimuscular, biarticular systems. *Acta Morph. neerl Scand*, 1961, 3, 3-4, 287-321

Landsmeer J.M.F.; *Atlas of anatomy of the hand.* Churchill Livingstone, Edimburgh London and New York, 1976

Lin G.T., Amadio P.C., An K.N., Cooney W.P.; Functional anatomy of the human digital flexor pulley system. *Hand Surg.*, 1989; 14A, 949-956

Linscheid R.W., Dobyns J.H.; Rheumatoid arthritis of the wrist. *Ortho. Clin. of North America*, 1971, 2, 649

Linscheid R.W., Dobyns J.H., Beabout J.W., Bryan R.S.; Traumatic instability of the wrist: diagnosis, classification and pathomechanics. *J. Bone Joint Surg. (Am)*, 54: 1612, 1672

Littler J.W.; Les principes architecturaux et fonctionnels de l'anatomie de la main. *Rev. Chir. Orthop.*, 1960, 46, 131-138

Littlet J.W.; The physiology and dynamic function of the hand. *Surg. Clin. N. Amer.*, 40, 256, 1960

Long C., Brown E.; Electromyographic kinesiology of the handmuscle moving the long finger. *J. Bone and Joint Surg. Am.*, 46A, 1683, 1964

Long C., Brown E.; Electromyographic kinesiology of the hand. Part III. Lumbricalis and flexor digitonum profundus to the long finger. *Arch. Phys. Med.*, 1962, 43, 450-460

Long C., Brown E. et Weiss G.; Electromyographic study of the extrinsic-intrinsic kinesiology of the hand. Preliminary report. *Arch. Phys. Med.*, 1960, 41, 175-181

Lundborg G., Myrhage E. et Rydevik B.; Vascularisation des tendons fléchisseurs dans la gaine digitale. *J. Hand Surg.*, 1977, 2, 6, 417-427

Mac Conaill M.A., Barnett C.H., Dvies D.V.; *Synovial Joints*, Longhans Ed., London, 1962

Mac Conaill M.A.; Movements of bone and joints. Significance of shape. *J. Bone and Joint Surg.*, 1953, 35B, 290

Mac Conaill M.A.; Studies in the mechanics of the synovial joints: displacement on articular surfaces and significance of saddle joints. *Irish J. M. Sci.*, 223-235, 1946

Mac Conaill M.A.; *Studies on the anatomy and function of Bone and Joints*. 1966, F. Gaynor Evans, Ed. New York

Mac Conaill M.A.; Studies in mechanics of synovial joints; hinge joints and nature of intra-articular displacements. *Irish J. M. Sci.*, 1946, Sept., 620

Mac Conaill M.A.; The geometry and algebra of articular Kinematics. *Bio. Med. Eng.*, 1966, 1, 205-212

Mac Conaill M.A. & Basmajian J.V.; *Muscle, and movements: a basis for human kinesiology*. Williams & Wilkins Co, Baltimore, 1969

Marey J.; *La machine Animale*, 1 Vol., Alcan, Paris, 1891

Moreaux A.; *Anatomie artistique de l'Homme*, 1 Vol., Maloine, Paris, 1959

Okham Guillaume (d'); Moine franciscain anglais, philosophe scolastique (1280-1349); *Le Principe d'Économie Universelle*. Voir sur Internet

Palmer A.K., Glisson R.R., Werner F.W.; Ulnar variance determination. *J. Hand Surg.*, 7: 376, 1982

Palmer A.K., Werner F.W.; The triangular fibrocartilage complex of the wrist. Anatomy and function. *J. Hand Surg. Am*, 6, 153, 1981

Pieron A.P.; The mechanism of the first carpo-metacarpal joint. An anatomic and mechanical analysis. *Acta Orthop. Scand.*, 1973, supplementum, 148

Poirier P. & Charpy A.; *Traité d'Anatomie Humaine*, Masson Ed., Paris, 1926

Rabischong P.; Innervation proprioceptive des muscles lombricaux chez l'homme. *Rev. Chir. Orth.*, 1963, 8, 234

Rasch P. J & Burke R.K.; *Kinesiology and applied Anatomy. The science of human movement*, 1 Vol., 589p., Lea & Febiger, Philadelphia, 1971

Riemann Georg Friedrich Bernhard, mathématicien allemand (1826-1866); *La géométrie non euclidienne (à propos du paradoxe de Codmann)*, Voir sur Internet

Roud A.; *Mécanique des articulations et des muscles de l'homme*. Librairie de l'Université, Lausanne, F. ROUGE & Cie., 1913

Rouvière H.; *Anatomie humaine descriptive et topographique*. Masson Ed., Paris, 4[e] ed., 1948

Sauvé L., Kapandji M.; Une nouvelle technique de traitement chirurgical des luxations récidivantes isolées de l'extrémité cubitale inférieure. *J. Chir.*, 1936, 47, 4

Schuind F., Garcia Elias M., Cooney W.P. 3rd, An K.N.; Flexor tendon force: in vivo measurements. *L. Hand Surg.*, 1992, 17A, 291-298

Steindler A.; *Kinesiology of the Human Body*. 1 Vol., 708 p., Ch. C. Thomas, Springfield, 1964

Strasser H.; *Lehrbuch der Muskel und Gelenkemechanik*. Vol. IV, J. Springer, Berlin, 1917

Taleisnik J.; Post-traumatique carpal instability. *Clin. Orthop.*, 1980 : 149, 73-82

Taleisnik J.; *The Wrist*. 441 p., Churchill Livingstone, New York, 1985

Taleisnik J.; The ligaments of the wrist. *J. Hand Surg.*, 1976, 1-2, 110

Testut L.; *Traité d'anatomie humaine*. Doin, Paris, 1893

Thieffry S.; *La main de l'Homme*. Hachette littérature, 1973

Thomine J-M.; Examen clinique de la Main *in Traité de Chirurgie de la Main* par Raoul Tubiana, Ed. Masson, 1980

Tubiana R.; Les positions d'immobilisation de la main. *Ann. Chir.*, 1973, 27, 5, 459-466

Tubiana R.; *Mécanisme des déformations des doigts liées à un déséquilibre tendineux. La main rhumatoïde*. L'Expansion, Paris, 1969

Tubiana R., Fahrer M.; Le rôle du ligament annulaire postérieur du carpe dans la stabilité du poignet. *Rev. Chir. Orthop.*, 67 : 231, 1981

Tubiana R., Hakstian R.; *Le rôle des facteurs anatomiques dans les déviations cubitales normales et pathologiques des doigts. La Main Rhumatismale*. p. 11-21, L'Expansion, Paris, 1969

Tubiana R., Hakstian R.; *Les déviations cubitales normales et pathologiques des doigts. Étude de l'architecture des articulations métacarpophalangiennes des doigts. La main rhumatoïde*. Monographie du GEM, L'expansion scientifique française Ed., 1969

Tubiana R., Valentin P.; Anatomy of the extension apparatus. Physiology of the finger extension. *Surg. Clin. N. America.*, 44, 897-906 & 907-918, 1964

Tubiana R., Valentin P.; L'extension des doigts. *Rev. Chir. Orthop.*, 1963, T 49, 543-562

Valentin P.; *Contribution à l'étude anatomique, physiologique et clinique de l'appareil extenseur des doigts*. Thèse, Paris, 1962

Valentin P., Hamonet Cl.; Étude électromyographique de l'Opposant du Pouce et de l'Adducteur du pouce. *Rev. Chir. Orth.*, 56, 65, 1970

Vandervael F.; Analyse des mouvements du corps humain. Maloine Ed., Paris, 1956

Van Linge B. & Mulder J.D.; Fonction du muscle sus-épineux et sa relation avec le syndrome sus-épineux. Étude expérimentale chez l'homme. *J. Bone & Joint Surg.*, 1963, 45 B, 4, 750-754

Verdan C.; Syndrom of the Quadriga. *Surg. Clin. N. Amer.*, 40, 425-426, 1960

Von Recklinghausen H.; *Gliedermechanik und Lähmungsprostesen*. Vol. I, Julius Springer, Berlin, 1920

Watson H.K., Ballet F.L.; The SLAC wrist: scapholunate advanced collapse. Pattern of degenerative arthritis. *J. Hand Surg.*, 1948, 9A: 358-385

Winckler G.; Anatomie normale des tendons fléchisseurs et extenseurs de la main, leur vascularisation macroscopique in *Chirurgie des tendons de la main*. Cl Verdan Editor GEM, Monographie, Expansion Scientifique, Paris, 14-21, 1976

Zancolli E.A.; *Structural and Dynamic basis of hand surgery*. Lippincott, Philadelphia, 1968, 2[nd] ed., 1979

Zancolli E.A., Zaidenberg C., Zancolli E.R.; Biomechanics of the trapeziometacarpal joint. *Clin. Orthop.*, 220, 1987

Modèle mécanique de main à découper et monter

Les modèles mécaniques proposés dans ces ouvrages, construits par découpage, pliage et collage, sont destinés à concrétiser dans l'espace des notions exposées dans texte ; ce sont des schémas à trois dimensions, doués de possibilité de mouvement. En les construisant, on peut acquérir sans effort, grâce au sens kinesthésique qu'ils requièrent, des connaissances difficiles à découvrir autrement. Il est donc très fortement recommandé au lecteur d'y consacrer un peu de temps et de patience ; il en sera récompensé.

Avant de commencer, il est indispensable de lire attentivement l'ensemble des instructions.

Ce modèle comporte quatre pièces A, B, C, D, réparties sur les planches I et II. À la partie inférieure de la planche II, se trouvent les schémas de montage a, b et c.

Pour des raisons tenant à l'édition de cet ouvrage, la page sur laquelle ces dessins sont imprimés ne peut avoir l'épaisseur d'un carton donnant une bonne tenue au modèle ; il faut donc reporter les dessins des quatre pièces A, B, C, D, sur un carton d'au moins un millimètre d'épaisseur à l'aide d'un papier carbone.

Découpage

Les quatre pièces sont découpées aux ciseaux suivant le trait plein de la ligne de contour. Certaines pièces comportent des découpages de lignes intérieures à exécuter à la lame de couteau affutée (cutter) ou de scalpel.

- Pièce A entre les languettes h, j, k - Pièce D ligne droite près de m et n - ligne brisée en trois segments près de m' et n'.

Il y a aussi des évidements marqués par :

- de grosses hachures - Pièce A près de k' - Pièce D fente centrale ;
- des doubles traits parallèles sur les pièces A et C : il faut faire une fente étroite entre les 2 traits rapprochés, ceci pour recevoir ultérieurement les poulies tendineuses (voir schéma c).

Il faut aussi percer les trous :

- trous circulaires : passages des tendons dont les numéros correspondent au schéma c ;
- trous circulaires centrés par une croix : insertions des tendons ;
- simples croix : fixation d'élastiques de rappel.

Pliage

Aucun pli ne sera formé sur le carton avant d'avoir été incisé à la lame de rasoir ou de scalpel sur le tiers ou la moitié de l'épaisseur du carton, du côté opposé au sens de la pliure :

- incisure au recto pour les lignes formées de tirets ;
- incisure au verso pour les lignes formées de points-tirets ; pour reporter ces dernières au verso de façon précise, il est commode de marquer leurs extrémités en perforant le carton à l'aide d'une fine aiguille ou la pointe d'un compas.

Après avoir été incisé, le carton se plie facilement et de façon très précise vers le côté opposé à l'incisure ; lors de ces pliages, la flexion du carton ne doit jamais dépasser d'emblée 45°. Les deux plis longitudinaux de la pièce A sont à peine marqués et réalisent le creusement de la paume. Les plis marqués axe 1 sur A et axe 2 sur C sont de 90°. Les deux plis convergents à partir des extrémités de l'axe 1 sur la pièce A sont de plus de 90°, de même que ceux des languettes j et h. La pièce B ne comporte aucun pliage.

Remarquez, sur la pièce C, l'obliquité des plis de flexion de l'I.P et de la M.P, qui traduisent le mode de flexion très particulier de ces deux articulations ; pour la M.P, on a pris l'un des trois axes, celui qui, lors de l'opposition du pouce, permet la flexion-pronation-inclinaison radiale.

Montage

Le schéma **a** montre le montage des éléments :
- le socle (pièce D) est monté par rapprochement et coïncidence de m sur m' et de n sur n'. On peut alors soit coller les languettes m et n sur les surfaces hachurées m' et n', soit, si l'on veut pouvoir démonter ultérieurement le modèle, les assembler par des agrafes parisiennes passées dans les trous m, m', n et n'.
- sur la main (pièce A) après avoir marqué les plis des doigts et de la paume, il faut préparer le support de l'articulation trapézo-métacarpienne :
  - 1 la surface semi-circulaire hachurée est rabattue de 90, en arrière ;
  - 2 les deux triangles sont rabattus vers l'avant pour former une pyramide triangulaire à base supérieure ;
  - 3 cette pyramide est maintenue :
    - soit par collage des languettes h et j sur les surfaces h' et j' (montage définitif) ;
    - soit par fixation de la languette k, passant dans l'évidement entre h' et j', rabattue en arrière de k' et fixée par une agrafe parisienne passée dans les trous k et k' (modèle démontable).
- le pouce (pièce C), après avoir été préparé par le pliage de l'axe 2 vers l'arrière (flèche 1) est collé (flèche 2) sur le recto de la pièce B, f sur f, en faisant coïncider les trous et les lignes d'axe 2. Cet ensemble est ensuite collé (flèche 3) sur la pyramide supportant le pouce en appliquant le verso g' de la pièce B sur le recto g de la pièce A de telle sorte que les trous coïncident ainsi que les lignes d'axe 1.

  L'articulation de type cardan à deux axes 1 et 2 de la trapézo-métacarpienne se trouve ainsi réalisée.

Le schéma **b** montre comment on fixe la main sur son socle en engageant sa base dans la fente centrale.

Utilisation

Tel qu'il est alors, ce modèle permet de comprendre par mobilisation passive trois caractéristiques fonctionnelles fondamentales de la main :

1) **Le creusement de la paume**, par flexion sur les deux plis longitudinaux, qui simule les mouvements d'opposition du 4e et surtout du 5e métacarpien ;

2) **La flexion oblique des doigts**, qui les amène à converger vers la base de l'éminence thénar grâce à l'obliquité de plus en plus marquée des axes des interphalangiennes et des métacarpo-phalangiennes, lorsqu'on le porte de l'index vers l'auriculaire (exemple de rotation conique). Ce phénomène est aidé par l'opposition des rayons métacarpiens internes (4e et surtout 5e métacarpiens).

3) **L'opposition du pouce**

Les trois cas de rotation plane, de rotation conique et de rotation cylindrique envisagés dans le texte peuvent être vérifiés ici, en prenant l'axe 1 comme axe principal et l'axe 2 comme axe secondaire ; on peut ainsi vérifier que la flexion successive dans l'axe 2 et les deux autres articulations du pouce (MP et IP) permet de réaliser une rotation cylindrique de la dernière phalange du pouce qui change ainsi d'orientation sans que la flexion ait été marquée dans la trapézo-métacarpienne et sans que la rotation du premier métacarpien sur son axe longitudinal ait été importante. On peut constater que sans faire intervenir aucun jeu mécanique dans les articulations du pouce, il est possible de réaliser l'opposition en « petite et en grande course » de l'index jusqu'à l'auriculaire avec un ehangement d'orientation de la pulpe du pouce correspondant exactement à la réalité.

La flexion-pronation de l'inter-phalangienne ainsi que celle de la métacarpo-phalangienne apparaissent grâce à l'obliquité des plis.

Installation des « tendons »

Il est possible d'animer ce modèle en installant des « tendons » (schéma **c**). Ceux-ci sont constitués par du cordonnet bloqué par un nœud au niveau de leur insertion phalangienne (trous circulaires centrés par une croix), passant ensuite par les « poulies » préparées au niveau des phalanges et les trous ménagés dans le socle.

Les poulies peuvent être facilement confectionnées par de petites bandes de carton large de 6 mm, assez souples pour être incurvées en tunnel ; chacune de leurs extrémités est passée d'avant en arrière dans les fentes ménagées sur les pièces A et C, et collée sur la face dorsale, après avoir été rabattue vers l'extérieur (en oméga).

La seule exception est la double poulie 2-7 de la pièce C : elle est ventrale pour 2 et dorsale pour 7 (deux omégas inversés l'un par rapport à l'autre).

Trajet des tendons

Chaque tendon est repéré par un numéro sur tout son trajet :

1) Long abducteur du pouce : fixé sur la pièce B, il mobilise la trapézo-métacarpienne autour de son axe principal (axe 1).
2) Fléchisseur propre du pouce : fixé sur la 2e phalange, passant à travers la coulisse (2) de la première phalange dans la pièce B. Il fléchit les deux phalanges du pouce.
3) Ce « tendon » à direction transversale, fixé sur le premier métacarpien (3), se réfléchissant dans une poulie de la paume (3), est à la fois l'équivalent de l'adducteur et du court fléchisseur.
4) Fléchisseur profond de l'index fixé sur la 3e phalange de l'index (4) et passant à travers 3 poulies - il fléchit l'index en totalité.
5) Ce « tendon » à direction transversale, symétrique du 3, est fixé sur une cale de 6 à 7 mm d'épaisseur (trapèze hachuré 5) ; il se réfléchit dans la paume sur la poulie 5 - il est l'équivalent de l'opposant du 5e.
6) Fléchisseur profond de l'auriculaire (même trajet, même fonction que le 4).
   N.B. Les fléchisseurs des 3e et 4e doigts n'ont pas été installés par esprit de simplification, mais on pourrait très bien le faire sans difficulté.
7) Ce tendon n'est pas visible sur le schéma. C'est le long extenseur propre du pouce : il se fixe à la face dorsale de sa 2e phalange dans le même trou que le fléchisseur propre (les deux nœuds sont opposés), passe dans la poulie 7 de la face dorsale de sa première phalange puis dans un trou dans la pièce B.

À l'extrémité de chaque tendon, on peut faire soit des boucles pour passer les doigts, soit attacher des anneaux ce qui permet de mobiliser plus facilement les tendons.

Pour stabiliser le pouce dans une position de fonction, on peut utiliser des élastiques qui maintiendront les axes 1 et 2 dans une position moyenne.

Pour l'axe 1, l'élastique part d'un des trous de la pièce B, se réfléchit sur le trou e de la base de la pièce A, et vient se fixer de nouveau sur la pièce B au niveau de l'autre trou e, - la position moyenne étant trouvée en faisant coulisser l'élastique dans le trou de la pièce A. L'élastique est bloqué par un point de colle de part et d'autre. La même opération est réalisée pour stabiliser l'axe 2 entre les 3 trous marqués e, sur les pièces B et C. Pour assurer le retour en extension de l'index et du 5e, on peut tendre un élastique sur leur face dorsale, entre les trous 4 et 6 et d'autres trous qui seront pratiqués sur la partie palmaire de la pièce A. Là encore le réglage peut être bloqué à la colle.

Animation du modèle

Grâce aux tendons, il est possible de réaliser pratiquement tous les mouvements de la main.

1) **Creusement de la paume** en tirant sur le tendon 5 (l'efficacité de cette manœuvre dépend de la hauteur de la cale 5).
2) **Flexion de l'index et de l'auriculaire** par traction sur les tendons 4 et 6.
3) **Animation du pouce**
   a) **Mise du pouce dans le plan de la paume** (main plate : position initiale de l'expérience de Sterling-Bunnel) : en tirant de façon équilibrée sur les tendons 7 et 3.
   b) **Opposition pouce-index** : tandis qu'on fléchit l'index il faut simultanément tirer sur les tendons 1, 3 et 7.
   c) **Opposition pouce-5e** : tandis qu'on fléchit le 5e, il faut simultanément tirer sur les tendons 1, 3 et 4.
   d) **Opposition pouce-base de l'auriculaire** : traction sur les tendons 1 et 2 et éventuellement 3.
   e) **Opposition termino-latérale pouce-index** : comme pour b, mais en fléchissant plus l'index.

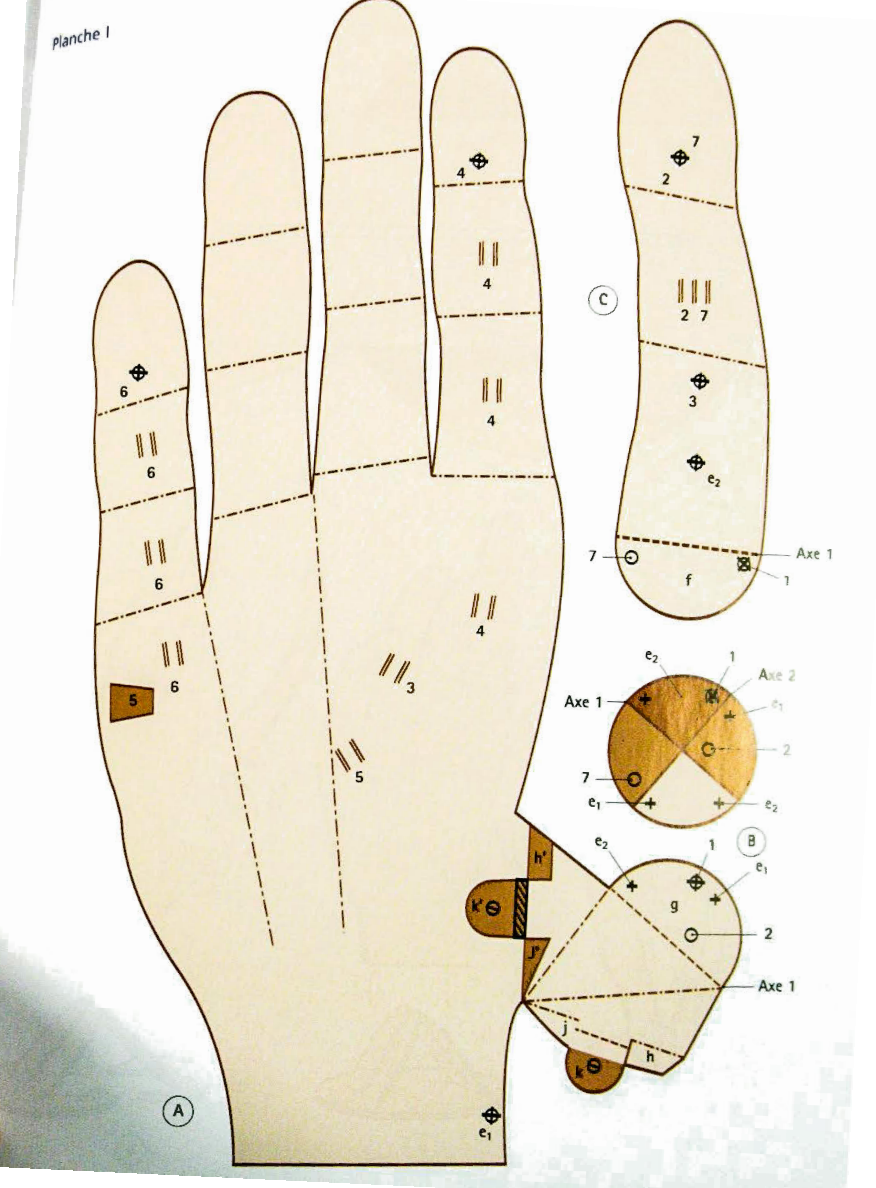
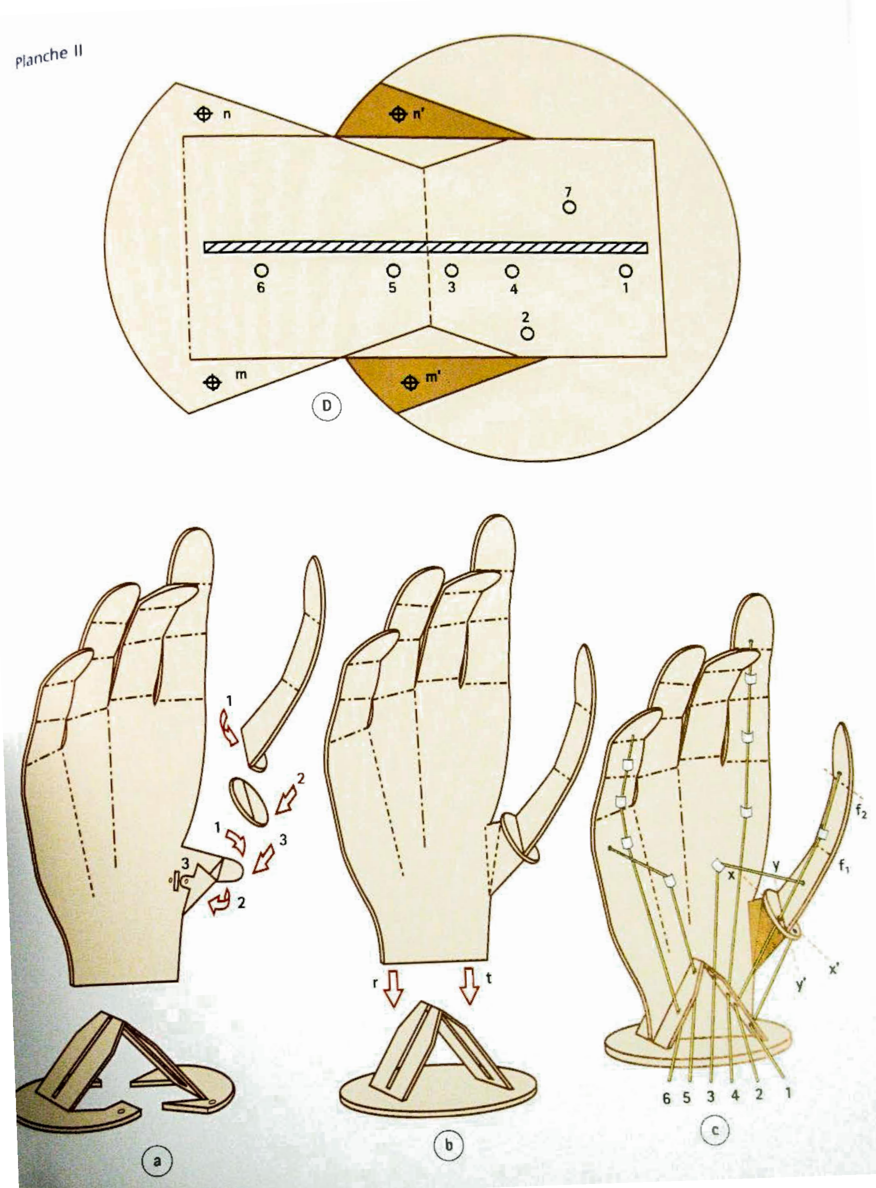


Planche I
4
4
4
C
7
2
2 7
3
e2
6
6
6
4
6
5
3
5
Axe 1
7
f
1
e2
1
Axe 2
Axe 1
e1
2
7
e1
e2
B
e2
1
e1
h'
k'
g
2
j°
Axe 1
j
h
k
A
e1


Planche II
n
n'
m
m'
7
6
5
3
4
1
2
D
1
2
1
3
3
2
r
t
f₂
f₁
y
x
x'
y'
6 5 3 4 2 1
a
b
c